

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

JOSYENE EMANOELLA ALVES DA SILVA

**A QUALIDADE DE ENERGIA NO CONTEXTO DE REDES
INTELIGENTES**

VIÇOSA
2014

JOSYENE EMANOELLA ALVES DA SILVA

**A QUALIDADE DE ENERGIA NO CONTEXTO DE REDES
INTELIGENTES**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Mauro de Oliveira Prates.

VIÇOSA
2014

JOSYENE EMANOELLA ALVES DA SILVA

**A QUALIDADE DE ENERGIA NO CONTEXTO DE REDES
INTELIGENTES**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 12 de Dezembro de 2014.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Mauro de Oliveira Prates- Orientador
Universidade Federal de Viçosa

Prof. Dr. José Carlos da Costa Campos - Membro
Universidade Federal de Viçosa

Msc. André Luis Carvalho Mendes - Membro
Universidade Federal de Viçosa

“O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário.”

Albert Einstein

Aos meus pais, pela paciência que tiveram comigo.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a DEUS, pois, sem ELE, nada disso seria possível. E ELE, que me deu força e muita garra para chegar até aqui.

Agradeço ao meu orientador Prof. Mauro de Oliveira Prates, que sempre esteve disposto a me ajudar, disponibilizando seu tempo e me orientando neste trabalho.

Quero agradecer também a todos os professores que fizeram parte da minha trajetória, que me ensinaram não só a ser uma profissional, mas também cidadã.

Aos meus colegas do curso de Engenharia Elétrica pelo apoio, paciência e todo conhecimento compartilhado.

Ao meu namorado, que sempre me apoiou e me incentivou a ir atrás dos meus objetivos.

À minha família, que mesmo estando fisicamente longe de mim, acreditaram na minha capacidade, me apoiando e me dando força.

Resumo

Os avanços tecnológicos permitem, ao longo do tempo, uma maior integração das redes de energia elétrica. Porém, tais avanços só são possíveis se o sistema elétrico oferece confiabilidade e segurança. A qualidade de energia elétrica (QEE) é um indicativo que permite melhorar o desempenho da rede. Presente nas indústrias, concessionárias de energia, fabricantes de equipamentos e consumidores, ela representa um fator de suma importância para o setor elétrico. Os problemas mais presentes na QEE é a presença de distúrbios elétricos, variações de tensão de curta e longa duração, ruídos, transitórios, etc. Os indicadores de qualidade sofrem alterações a cada dia em relação aos valores máximos permitidos. O desenvolvimento de equipamentos para as redes inteligentes tem o intuito de diminuir esses índices, tornando as linhas de distribuição mais confiáveis e fornecendo energia elétrica de forma mais eficiente do que o sistema atual. O objetivo deste trabalho é desenvolver um estudo teórico da Qualidade de Energia em sistemas com *Smart Grid*. Seu embasamento concentra-se na preocupação da junção da QEE e *Smart Grid*. Uma análise da tendência crescente da geração distribuída foi discutida, visto que a ideia da rede inteligente é suprir o crescimento da demanda. Além disso, foi feita uma abordagem da utilização de medidores inteligentes que vem com o intuito de permitindo uma melhor gestão do consumo e maior integração com as concessionárias. E, por fim, foi apresentado dois projetos piloto, um na Noruega e outro na Colômbia, a fim de contextualizar a necessidade de encontrar alternativas para resolução de problemas associadas à QEE no contexto de redes inteligentes.

Abstract

Technological advances allow a larger integration among electrical power networks. However, such advances are possible only if the electrical system is both reliable and safe. Power energy quality (PEQ) is a tool that allows making the network performance better. Present in industry, utilities, manufacturers and customers, PEQ represents a very important issue to power electrical area. The most common problems concerning PEQ are electrical perturbations, short and long time voltage fluctuation, noise and transients. Maximum and minimum allowed values for quality indicators are constantly changed. The equipment development of smart grids is in order to decrease such indexes, making the transmission lines more reliable and supply electrical power in a more efficiently way than the today's system. The subject of this work is to develop a theoretical study concerning the power quality in smart grid systems. Its basis focuses on join QEE and smart grid. A analysis of increasing tendency of distributed generation was discussed, since the smart grid purpose is to supply the growing demand. In addition to, an approach on the use of smart grid was made in order to indicate a more effective consumption management and utilities integration. Finally two pilot projects was shown (one from Norway and another from Colombia) to contextualize the sick of finding ways to solve QEE problems regarding smart grids.

Sumário

1	Introdução.....	13
1.1	Estrutura do Trabalho	15
1.2	Objetivos.....	15
2	Qualidade de Energia Elétrica e Smart Grids	16
2.1	Qualidade de Energia Elétrica	16
2.1.1	Introdução	16
2.1.2	Qual a importância da Qualidade de Energia Elétrica?	23
2.2	Smart Grids.....	23
2.2.1	O conceito de Smart Grids (Redes Inteligentes)	24
2.2.1.1	Telecomunicações	27
2.2.1.2	Automação Avançada.....	27
2.2.2	Veículos Elétricos.....	28
2.3	Smart Grids no mundo.....	30
2.3.1	Ásia.....	30
2.3.2	América	30
2.3.3	Europa.....	31
2.3.4	Oceania	31
2.3.5	África.....	32
2.4	Smart Grids no Brasil	32
3	A junção: Qualidade de Energia Elétrica e Smart Grids.....	36
3.1	Projetos Pilotos	40
3.1.1	Noruega	40
3.1.2	Colômbia	44
4	Considerações Finais.....	47
	Referências Bibliográficas	48
	Apêndice A –.....	51
A.1	Portaria N°440, de 15 de abril de 2010.....	51

Lista de Figuras

Figura 1-Efeito Flicker	17
Figura 2- Efeito Notching.....	18
Figura 3-Perdas nos motores de indução por desequilíbrio de fase	19
Figura 4-Elevação de tensão.....	19
Figura 5-Afundamento de tensão	20
Figura 6-Tensão alternada senoidal com presença de ruído.....	21
Figura 7-Interferência eletromagnética	21
Figura 8-Influência das distorções harmônicas	22
Figura 9-Evolução das redes inteligentes	25
Figura 10-Topologia de Redes Inteligentes.....	26
Figura 11-Tecnologia Zigbee em residências.....	27
Figura 12-Sistema de carga de veículos elétricos.....	29
Figura 13-Concentração de CO2	29
Figura 14-Previsão de investimentos em <i>Smart Grid</i> no Brasil (em%)	33
Figura 15-Mapa do Sistema Interligado Nacional Brasileiro, 2015	34
Figura 16-Índice de desempenho versus quantidade de geração distribuída.....	37
Figura 17-Princípio da arquitetura de redes inteligentes- supervisão e medição	38
Figura 18- Concentradores hierarquizados em uma rede tipo Mesh.....	38
Figura 19-Infra-estrutura de medição inteligente na Noruega.....	41
Figura 20-Projeto piloto de uma rede inteligente na rede de distribuição da Colômbia	45
Figura 21-Distorção Harmônica versus quantidade de geração distribuída	46

Lista de Tabelas

Tabela 1-Categorias e Características dos principais distúrbios eletromagnéticos	22
Tabela 2-Tempo de resposta de um medidor inteligente na solicitação de dados.....	43

1 *Introdução*

Atualmente a preocupação com a qualidade de energia não é só das empresas de energia elétrica, bem como dos seus usuários finais. No fim da década de 80, o termo qualidade de energia elétrica se tornou algo expressivo para a indústria de energia. Os principais motivos para tal preocupação se dão pela introdução de sistemas de controle microprocessados e dispositivos de eletrônica de potência, sistemas interligados em uma única rede e percepção dos usuários finais relacionada com questões como interrupções e quedas de energia. A utilização de alguns equipamentos para aumentar a produtividade de energia, constantemente acarreta problemas adicionais de sua qualidade como é o caso de inversores utilizados na conexão de painéis fotovoltaicos. A necessidade de processos cada vez mais automatizados e funcionamento de máquinas eficientes tornam-se necessário o fortalecimento das novas tecnologias [1].

Aliado a esse contexto, surgiram às redes inteligentes- “*Smart Grid*”(SG) — que não é um tipo de tecnologia específica, pelo contrário, é uma integração de todo o sistema elétrico que utiliza de uma intensiva tecnologia da informação e comunicação, além de proporcionar a inserção de novas estratégias de controle e potencialização da rede de forma a suprir a necessidade dos dias atuais.

O surgimento do conceito “*Smart Grid*” no sistema de energia elétrica, irá mudar consideravelmente a configuração do sistema atual. A reestruturação do setor elétrico visa aumentar a eficiência na geração, transmissão e distribuição de energia, bem como oferecer eficiência no serviços ofertados no mercado. Será de forma gradual a inserção das redes inteligentes, o que significa uma mudança lenta porém com resultados significativos. O consumidor tende a ser a esfera mais afetada com as mudanças, pois a sua participação no mercado será ainda maior, tendo em vista a possibilidade de não só consumir energia mas também gerá-la [2][3].

O “*Smart Grid*” irá monitorar e supervisionar as falhas da rede através de softwares, oferecendo assim uma qualidade de energia de forma diferente, possibilitando que o mercado disponha de preços mais flexíveis para os seus clientes . Além disso, problemas de qualidade de energia causados ao longo das linhas de transmissão derivado do aquecimento dos cabos e demais equipamentos serão minimizados, visto a possibilidade da produção de energia próxima ao consumidor. Já nas redes de distribuição problemas como fraude e furtos

serão reduzidos devido a utilização de equipamentos e medidores modernos, diminuindo assim os impactos na no sistema elétrico.

O fundamento das redes inteligentes se baseia na capacidade de coordenar simultaneamente recursos variados para realizar tarefas específicas. E o fato da QEE- (Qualidade de Energia Elétrica) ser uma interação entre os equipamentos conectados e a própria rede, é possível criar novas formas de gerenciar a QEE dentro das redes inteligentes. Atualmente o gerenciamento da QEE é feito principalmente nas informações do fluxo de potência, e é em tempo real. Isso permite que mudanças na rede seja feita de forma automática, evitando perdas e interrupções no sistema elétrico.

Dentro deste contexto, também encontram-se os sistemas de geração distribuída (GD), e estes apresentam algumas desvantagens relacionadas à QEE. Atualmente sistemas de GD são utilizados para economizar investimentos e reduz perdas nas linhas de transmissão, porém a sua inserção na estrutura das redes inteligentes são, na sua maioria, as fontes alternativas de energia, tais como: energia eólica e solar. Com relação à energia eólica, a potência entregue pela turbina aumenta, a medida que a velocidade dos ventos aumenta. O excesso da produção de energia devido ao aumento desta velocidade, caracteriza a necessidade de se utilizar sistemas de armazenamento. Isso seria mais um desafio das redes SG, já que sistemas de armazenamento requerem uma maior flexibilidade quando muda a configuração da rede elétrica [2].

Dessa forma, a junção da QEE com as redes inteligentes irá proporcionar várias abordagens de desafios que estão presentes no setor elétrico atual, visando buscar soluções para as demais tecnologias utilizadas, como: armazenamento de energia, geração distribuída, veículos elétricos, compatibilidade eletromagnética, entre outros.

1.1 Estrutura do Trabalho

Esse trabalho foi dividido em quatro capítulos. No 1º capítulo é apresentada a introdução e o objetivo do trabalho a ser desenvolvido.

O capítulo 2 é abordado o conceito de qualidade de energia e sua importância no sistema elétrico. Além disso, é definido também o conceito *Smart Grids* e suas áreas de aplicação: telecomunicação e automação. Em seguida, é feita uma contextualização das redes inteligentes no mundo e no Brasil mostrando os principais motivadores na implantação de novas tecnologias utilizando redes deste tipo.

O capítulo 3 aborda as consequências presentes nas redes inteligentes em termos de qualidade de energia, e possíveis soluções aos desafios que irão surgir. Finalmente, o capítulo 4 traz as considerações finais do tema.

1.2 Objetivos

O objetivo geral desse trabalho é o estudo da qualidade de energia elétrica em sistemas *Smart Grids*, ou seja, o que será afetado em termos de qualidade de energia nas redes inteligentes do futuro devido essa junção.

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- Expor os problemas relacionados à qualidade de energia.
- Expor as tendências das redes inteligentes.
- Propor soluções aos problemas de qualidade energia, presentes nas redes inteligentes.

2 Qualidade de Energia Elétrica e Smart Grids

Esse capítulo foi dividido em duas partes: Qualidade de Energia Elétrica (QEE) e *Smart Grids*. A primeira parte tem como objetivo apresentar as características da QEE e a sua importância. A segunda parte visa mostrar as alterações causadas no sistema elétrico a partir da inserção das *Smart Grids*, apresentando diversas áreas de aplicações desse novo conceito.

2.1 Qualidade de Energia Elétrica

2.1.1 Introdução

O termo Qualidade de Energia Elétrica pode ser definido de várias formas, dependendo da estrutura de referência. Enquanto algumas agências reguladoras definem esse conceito a partir de indicadores fornecendo estatísticas de confiabilidade, um fabricante de um equipamento pode definir esse mesmo conceito, a partir de características da fonte de alimentação de um determinado equipamento [1].

Segundo Costa [4], na segunda metade do século 60, a preocupação com a presença de harmônicas era um dos principais assuntos abordados em Qualidade de Energia Elétrica, apresentando impactos nos sistemas de transmissão em correntes contínuas em alta tensão (HVDC). Já na metade do século 70, problemas operacionais com computadores também foram atribuídos à má qualidade da energia elétrica. Desde então outros distúrbios passaram a ser associados à Qualidade de Energia, como é o caso de afundamentos de tensão e sobretensões.

Os problemas de qualidade de energia abrangem grandes áreas do sistema elétrico, inclusive distúrbios relacionados com a comunicação em redes, voltados para a transmissão de dados. O aparecimento destes problemas leva a busca de soluções através de medidas práticas e econômicas. É necessária a minimização dos distúrbios presentes na rede, principalmente aqueles que envolvem relações entre fornecedor e consumidor, pois é indispensável à disponibilidade um serviço de fornecimento de energia contínuo, evitando falhas e interrupções [30].

A análise da qualidade de energia elétrica no que se diz a respeito ao seu fornecimento, pode ser feita do ponto de vista de vários ângulos. Fatores como: continuidade do fornecimento, níveis de tensão, oscilações e distorções harmônicas de tensão, interferências em sistemas de comunicação são questões abordadas referentes ao desencadeamento de problemas do sistema. O controle e a avaliação desses fatores são bastante complexos, apresentando características peculiares que dificultam uma análise simples da QEE. Um entendimento das causas e as consequências desses fenômenos são de suma importância para essa análise [30] [1] [5].

Os distúrbios mais presentes na qualidade de energia elétrica são: cintilação ou *Flicker* — refere-se a variações luminosas. Essas variações dão a impressão de instabilidade visual. Podem causar de um simples incômodo até uma irritação visual. Entre as causas desse fenômeno são citadas pequenas flutuações de tensão provocadas por cargas com ciclo variáveis, sendo uma consequência indesejável. A frequência de operação de cargas variáveis resulta numa modulação da tensão da rede, no intervalo de 0 a 30 Hz. Nessa faixa, o olho humano é muito sensível à emissão luminosa. A Figura 1 ilustra a ocorrência da variação da tensão devido ao fenômeno de cintilação, ao se fazer uma comparação numa mesma escala entre os equipamentos que provocam esse mesmo efeito, é possível observar que os refrigeradores e as lâmpadas, apresentam uma variação menor nas oscilações da tensão em relação aos elevadores, fornos a arco e soldas a ponto[1] [5].

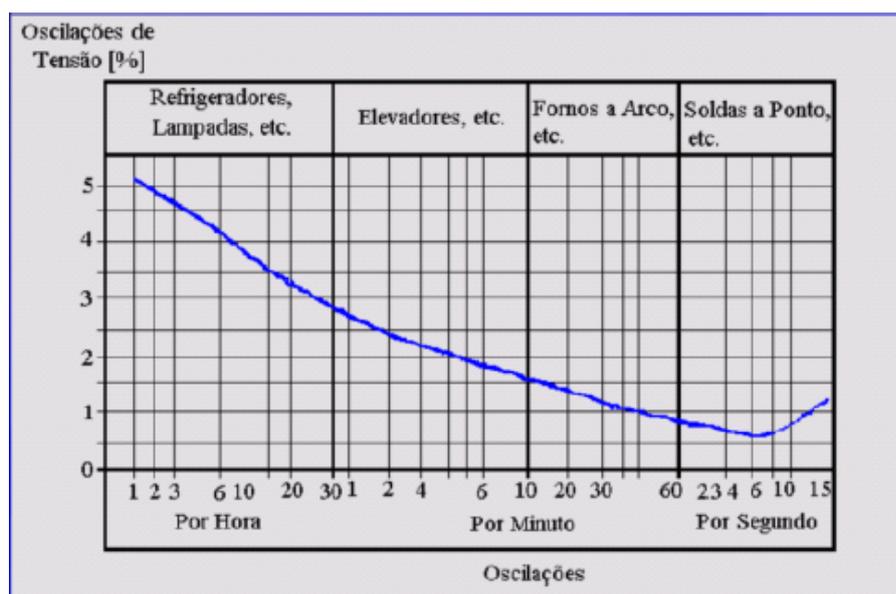


Figura 1-Efeito Flicker

Cunha de Tensão ou *Voltage Notch*— é um tipo de perturbação devido à operação normal de dispositivos eletrônicos de potência, em que se tem o afundamento brusco da tensão devido à comutação da corrente de uma fase para outra. É causada normalmente por conversores quando ocorrem curtos-circuitos momentâneos entra as fases. A Figura 2 mostra a deformação na onda senoidal devido a esse distúrbio [5].

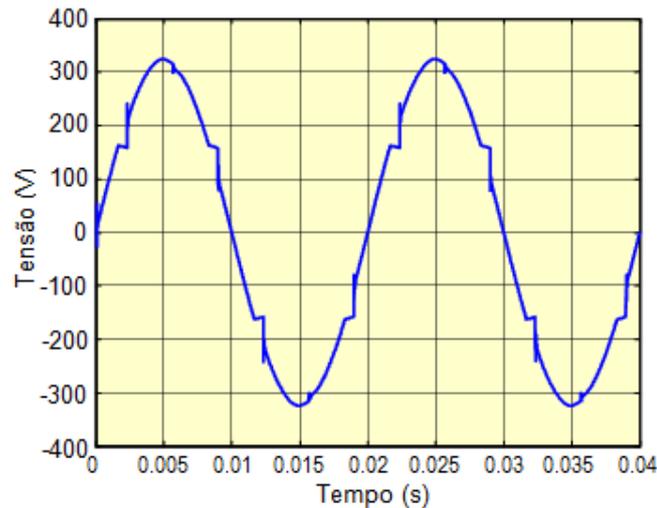


Figura 2- Efeito Notching

Desequilíbrio de Tensão ou *Voltage Imbalance* —desequilíbrio de tensão é por definição, a relação da tensão de sequência negativa e da tensão de sequência positiva, no ponto de acoplamento comum entre concessionária e consumidor. Mas é aplicável para qualquer ponto do SEP. A principal fonte de tensão de desequilíbrios são as cargas monofásicas em um circuito trifásico. A Figura 3 ilustra as perdas da vida útil em motores de indução trifásicos em função do desequilíbrio de tensão. Os efeitos das tensões da sequência negativa provocam um torque no eixo da máquina de indução, levando a um aumento da temperatura. Como consequência a vida útil do material isolante dos enrolamentos, diminui [20] [21].

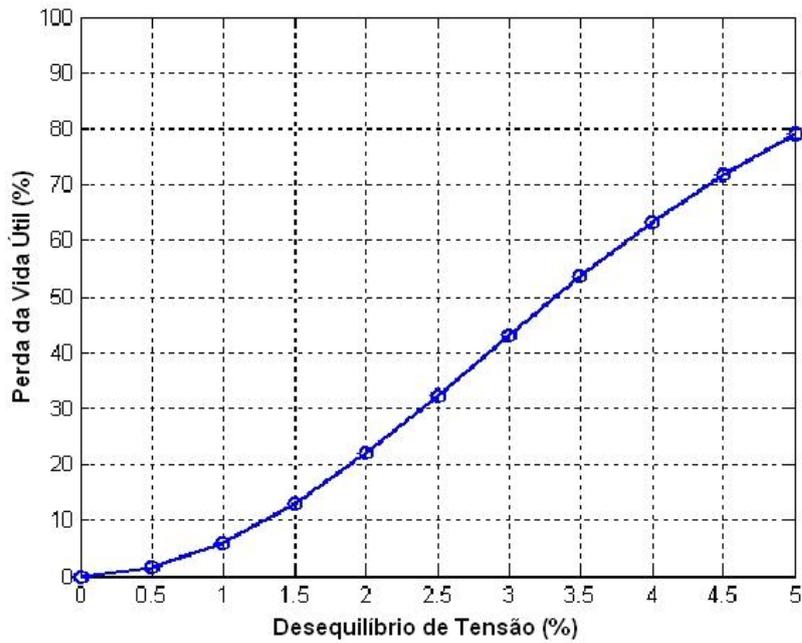


Figura 3-Perdas nos motores de indução por desequilíbrio de fase

Elevação de Tensão — é um aumento na tensão eficaz entre 1,1 e 1,8 pu. Com duração entre 0,5 ciclo a 1 min. Denomina-se esse tipo de distúrbio de *Voltage Swell* ou *Swel*. Se o tempo de duração for maior que 1min, tem-se uma sobretensão, denominada *Overvoltage*. Caso a elevação de tensão ocorra de forma instantânea, esse fenômeno é definido como *Spikes*. Faltas assimétricas e desligamentos de grandes motores são exemplos de distúrbio *Voltage Swell*. A Figura 4 mostra o que ocorre com a tensão devido a este distúrbio [5] [21] [22].

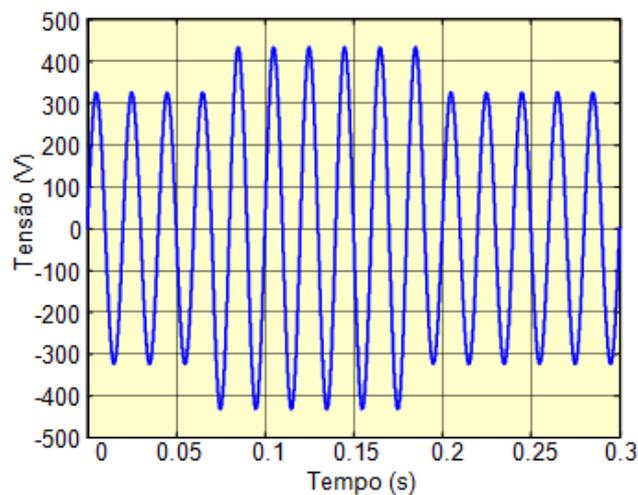


Figura 4-Elevação de tensão

Afundamento de Tensão: É uma queda de tensão de curta duração. A tensão eficaz se reduz em um intervalo de 0,1 a 0,9 pu, com duração de 0,5 ciclo a 1 min. Esse fenômeno é denominado *Voltage Sag*. Caso essa queda de tensão ocorra em um tempo maior que 1 min, esse fenômeno é definido como *undervoltage* (subtensão). A Figura 5 representa tal distúrbio, que pode ser causado, por exemplo, por uma falta fase-terra [5] [21] [22].

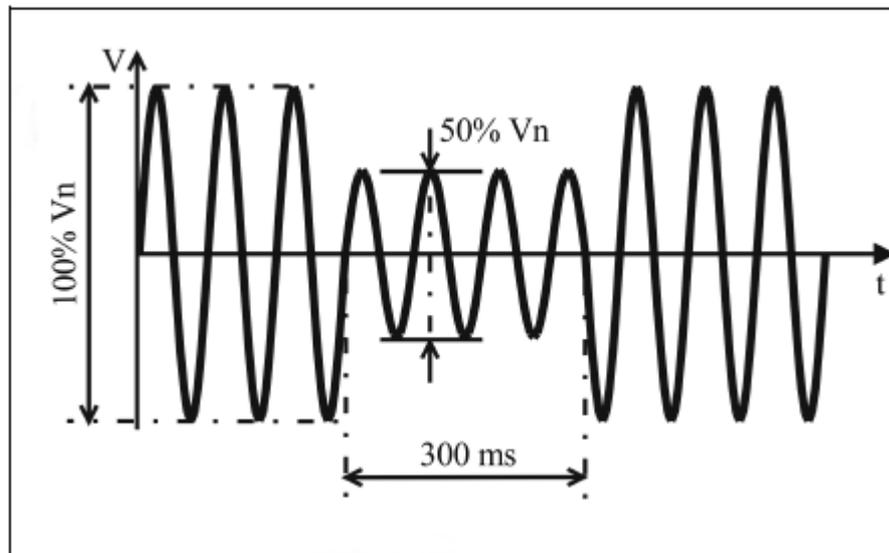


Figura 5-Afundamento de tensão

Ruído ou *Noise*—é a presença da distorção de um sinal senoidal devido à presença de um sinal em alta frequência. Pode ser causados por dispositivos eletrônicos, circuitos de controle e fontes chaveadas. Quando o ruído ocorre entre o neutro e o terra, denominados de ruído de modo comum. Já quando ocorre entre fases, é chamado de ruído de modo normal. A Figura 6, ilustra um sinal senoidal com ruído, nota-se uma distorção no sinal [5] [22].

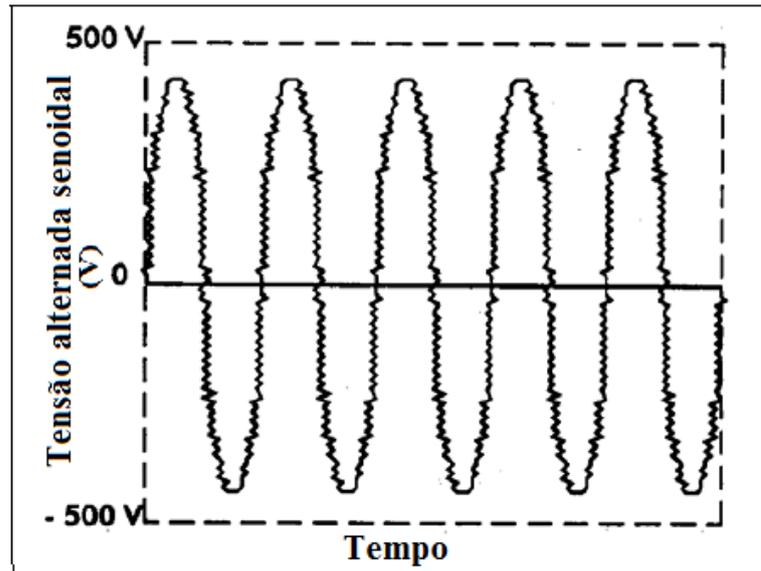


Figura 6-Tensão alternada senoidal com presença de ruído

Interferência eletromagnética- é fenômeno de alta frequência presente no meio ambiente ou em cabos elétricos que interferem na operação de outros equipamentos ligados a rede, ou seja, é um desgaste no desempenho de um equipamento devido à perturbação eletromagnética. A Figura 7, ilustra um sinal com e sem interferência eletromagnética. A presença desse distúrbio degrada com o tempo equipamentos como relés, disjuntores, chaves, equipamentos eletrônicos, etc[5] [23].

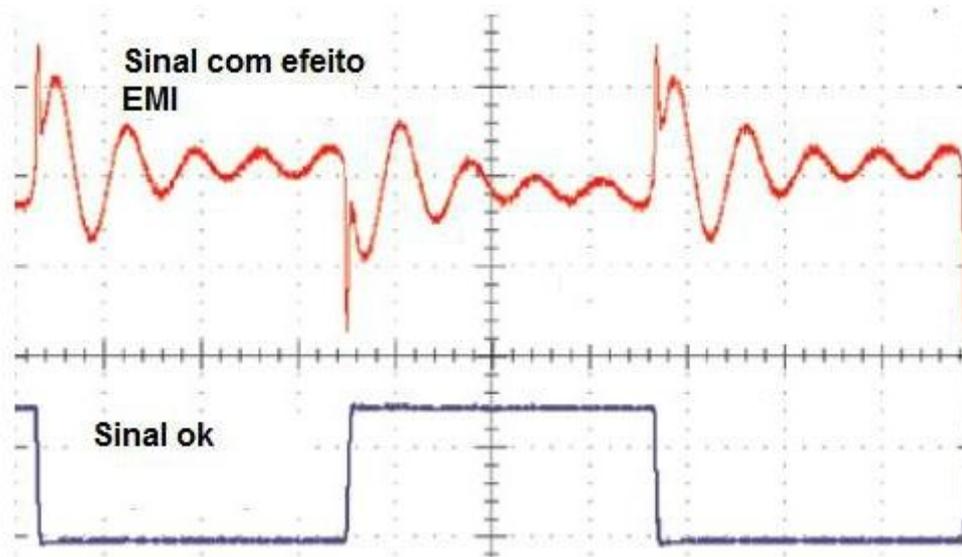


Figura 7-Interferência eletromagnética

Harmônicas e Inter-harmônicas: as distorções harmônicas são distorções nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental. Essas

distorções são devido a presenças de cargas não lineares no SEP. A Figura 8 mostra uma onda senoidal distorcida devido à presença de harmônicos [24].

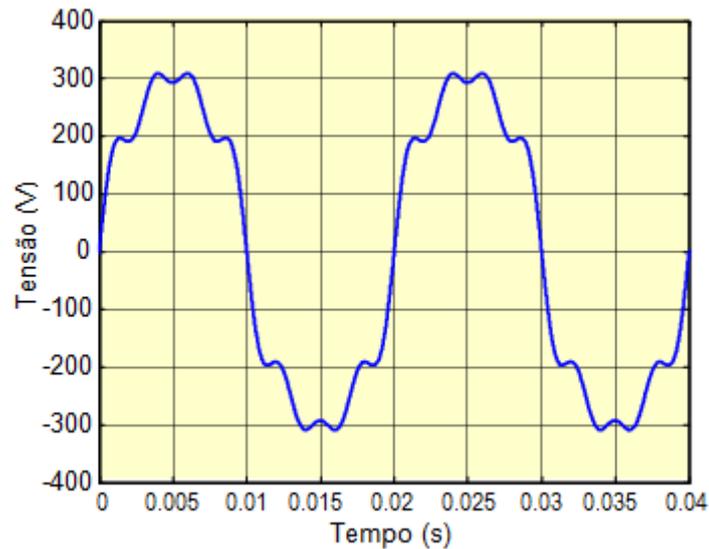


Figura 8-Influência das distorções harmônicas

A partir de uma análise desses fenômenos descritos anteriormente, é possível avaliar os problemas da qualidade de energia. Esses problemas dependem na maioria das vezes, da intensidade, duração ou da frequência do evento ocorrido. A Tabela 1 agrupa as categorias e os principais distúrbios presentes na avaliação da qualidade de energia[24].

Tabela 1-Categorias e Características dos principais distúrbios eletromagnéticos

Categorias	Espectro	Duração	Tensão
1.1 Transitórios Impulsivos			
1.1.1 Nanossegundos	5ns pico	<50ns	
1.1.2 Microssegundos	1 μ s pico	50 ns-1ms	
1.1.3 Milissegundos	0,1ms pico	>1ms	
1.2 Transitórios Oscilatórios			
1.2.1 Baixa Frequência	<5kHz	0,3-50ms	0 - 4 pu
1.2.2 Média Frequência	5-500kHz	20 μ s	0 - 8 pu
1.2.3 Alta Frequência	0,5-5Mhz	5 μ s	0 - 4 pu
2. Variações de Curta Duração			
2.1 Instantâneo			
2.1.1 Afundamento (Sag)		0,5-30 ciclos	0,1 - 0,9 pu
2.1.2 Elevação (Swell)		0,5-30 ciclos	1,1 - 1,8 pu
2.2 Momentâneo			
2.2.1 Interrupção		0,5 ciclos-3s	< 0,1 pu
2.2.2 Afundamento (Sag)		30 ciclos-3s	0,1 - 0,9 pu
2.2.3 Elevação (Swell)		30 ciclos-3s	1,1 - 1,4 pu
2.3 Temporário			

2.3.1 Interrupção		3s-1min	< 0,1 pu
2.3.2 Afundamento (Sag)		3s-1min	0,1 - 0,9 pu
2.3.3 Elevação		3s-1min	1,1 - 1,4 pu
3. Variações de Longa Duração			
3.1 Interrupção Permanente		>1min	0,0 pu
3.2 Subtensão		>1min	0,8 - 0,9 pu
3.3 Sobretensão		>1min	1,1 - 1,2 pu
4. Desequilíbrio de Tensão		Est. permanente	0,5 - 2%
5. Distorção da Forma de Onda			
5.1 Compensação CC (DC Offset)		Est. permanente	0 - 0,1%
5.2 Harmônicos	0-100thH	Est. permanente	0 - 20%
5.3 Inter-harmônicos	0-6kHz	Est. permanente	0 - 2%
5.4 Recortes de Comutação (Notching)		Est. permanente	
5.5 Ruído	Banda larga	Est. permanente	0 - 1%
6. Flutuação de Tensão	<25Hz	intermitente	0,1 - 7%
7. Variação de Frequência da rede		<10s	

É necessário um planejamento para monitorar a qualidade de energia elétrica. Identificar o problema e detalhar a partir de medidas e dados coletados, identificando suas causas, características e impactos. Apontar soluções viáveis dentro dos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, visando um beneficiamento para o setor elétrico. Posteriormente através de técnicas de modelagem, avaliar as possíveis alternativas de solucionar o problema. E por fim, fazer uma análise econômica a fim de propor a solução mais viável.

2.1.2 Qual a importância da Qualidade de Energia Elétrica?

A principal importância da Qualidade de Energia Elétrica (QEE) é agregar valor ao Sistema Elétrico de Energia (SEE), promovendo assim uma interação entre usuário, fabricante e concessionária. Há uma maior conscientização dos consumidores em relação aos problemas gerados pela rede elétrica, o que leva a um número maior de reclamações caso as normas não sejam cumpridas. Consequentemente, concessionárias sofrem perdas financeiras o que é significativamente maior do que uma perda de consumidores residenciais. Esses consumidores só têm a percepção da má qualidade quando estão utilizando equipamentos de tecnologia, como por exemplo, computadores [6] [7].

A participação dos órgãos regulamentadores é fundamental, pois além de controlar a qualidade na prestação de serviço, estabelecem regras e normas no sistema elétrico voltado para a gestão da qualidade de energia. A existência desses órgãos, normas nacionais e

internacionais é necessário para que as empresas tomem uma postura, mudando de atitudes e cumprindo com responsabilidades.

A análise dos indicadores utilizados na avaliação da QEE visa proporcionar aos consumidores menos interrupções e equipamentos de cargas mais resistentes aos distúrbios, bem como oferecer aos fabricantes opções de produzir produtos mais eficientes e confiáveis. Já as concessionárias terão os processos mais automatizados com equipamentos modernos e acessível controle, ou seja, o sistema terá respostas mais rápidas.

2.2 Smart Grids

2.2.1 O conceito de Smart Grids (Redes Inteligentes)

O conceito de *Smart Grids* pode ser visto de várias formas. O motivo disto é que tal definição depende das necessidades e do enfoque dado pelo seu autor. A integração do sistema de monitoramento, sensoriamento, tecnologia da informação e comunicação será de modo a permitir que a rede, através de análises e diagnósticos, tome decisões em tempo real, atuando de forma otimizada às necessidades da sociedade e do sistema elétrico.

Segundo a definição da IEA (2011)[8] de *Smart Grid*:

A *SmartGrid* é uma rede de energia elétrica que utiliza tecnologias digitais avançadas para monitorar e gerenciar o transporte de eletricidade de todas as fontes de geração, atendendo as necessidades de energia elétrica dos usuários finais. Essas redes irão coordenar as capacidades e necessidades de todos os geradores, operadores de rede, os usuários finais e partes interessadas no mercado de energia elétrica. Operando em todos os segmentos do sistema de forma mais eficiente; minimizando os custos e impactos ambientais e ao mesmo tempo maximizar confiabilidade do sistema, resistência e estabilidade.

Sistemas de energia no mundo enfrentam muitos desafios na implantação de redes inteligentes, visto que a configuração do sistema atual representa uma infraestrutura arcaica e há um crescimento da demanda no consumo de energia elétrica. Além de uma alta penetração de energias renováveis e veículos elétricos que também, são questões que devem ser abordadas sistematicamente. As SGs vêm não só para atender a esses desafios, mas também oferecer uma energia mais limpa, acessível, sustentável e mais eficiente em termos energéticos.

No passado a comunicação entre a rede era feita através das linhas telefônicas. Atualmente o setor elétrico possui uma quantidade maior de tecnologias de comunicação junto à rede, porém ainda não abrange todo o território. Na SGs, toda rede será interligada através dos medidores eletrônicos, meios de comunicação, sensores e computadores. A utilização de medidores eletrônicos possibilita alocar uma grande quantidade de dados nos centros de controles, e uma maior interoperabilidade entre os equipamentos instalados na rede. A presença de sensores possibilitará a automatização do sistema de distribuição, e o religamento automático dos dispositivos eletrônicos. A massa de dados recebida pelos centros de controles deve ser transformada em informação útil, o que significa a necessidade do uso de computadores. As redes inteligentes vêm com a perspectiva de se agregar ao sistema elétrico já existente, e não substituí-lo, algo inviável no panorama atual. A Figura 9 representa a evolução das redes inteligentes [8] [28].

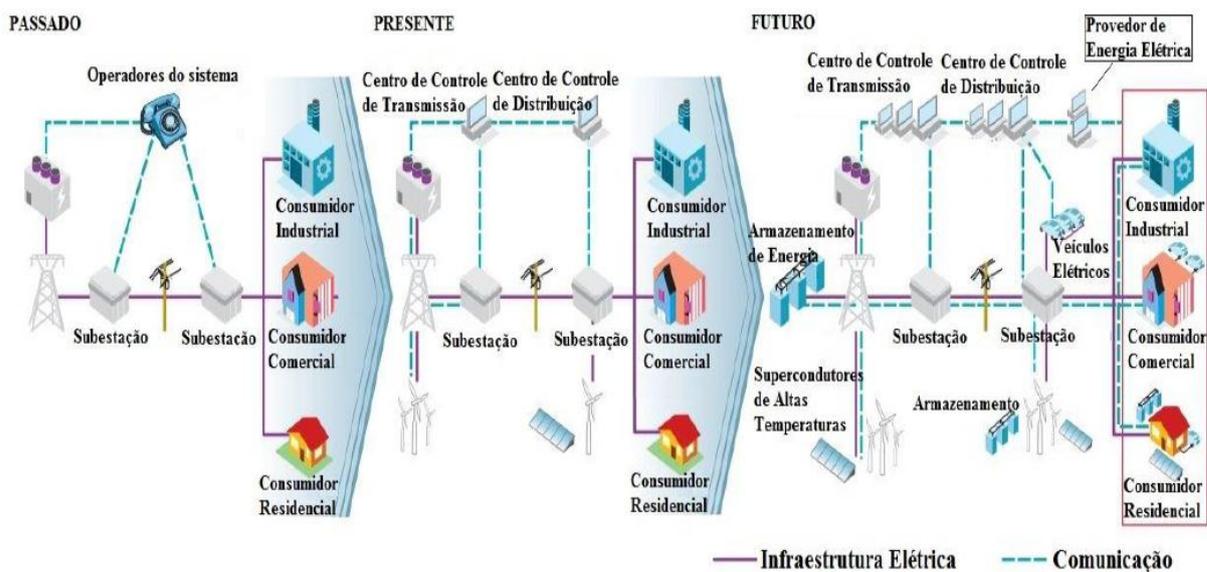


Figura 9-Evolução das redes inteligentes

Portanto, a obtenção de maior eficiência no SEE será de suma importância, pois mudanças significativas provenientes da integração de infraestruturas de tecnologia da informação e sistema de comunicação devem estar preparadas para chegada de diferentes fontes de geração distribuídas e veículos elétricos. Permitindo uma maior confiabilidade nos centros de controle de transmissão e distribuição.

As *Smart Grids* abrangem uma variedade de tecnologias englobando todo o setor elétrico. A inovação em sistemas de controle e monitoração, aperfeiçoamento da transmissão, gerenciamento da rede de distribuição, possibilitará uma troca de informação e uma maior integração nos meios de comunicação de todos os segmentos: geração, transmissão,

distribuição, indústria, prestação de serviços e residências. Proporcionando uma estrutura de medição avançada e próxima ao consumidor. É possível observar na Figura 10 que a topologia da rede acomoda as várias opções de geração de energia, em que o medidor inteligente irá se comunicar com a rede utilizando um concentrador e, além disso, fontes de energia terão a possibilidade de ser conectadas à rede, como veículos elétricos e painéis fotovoltaicos [28].

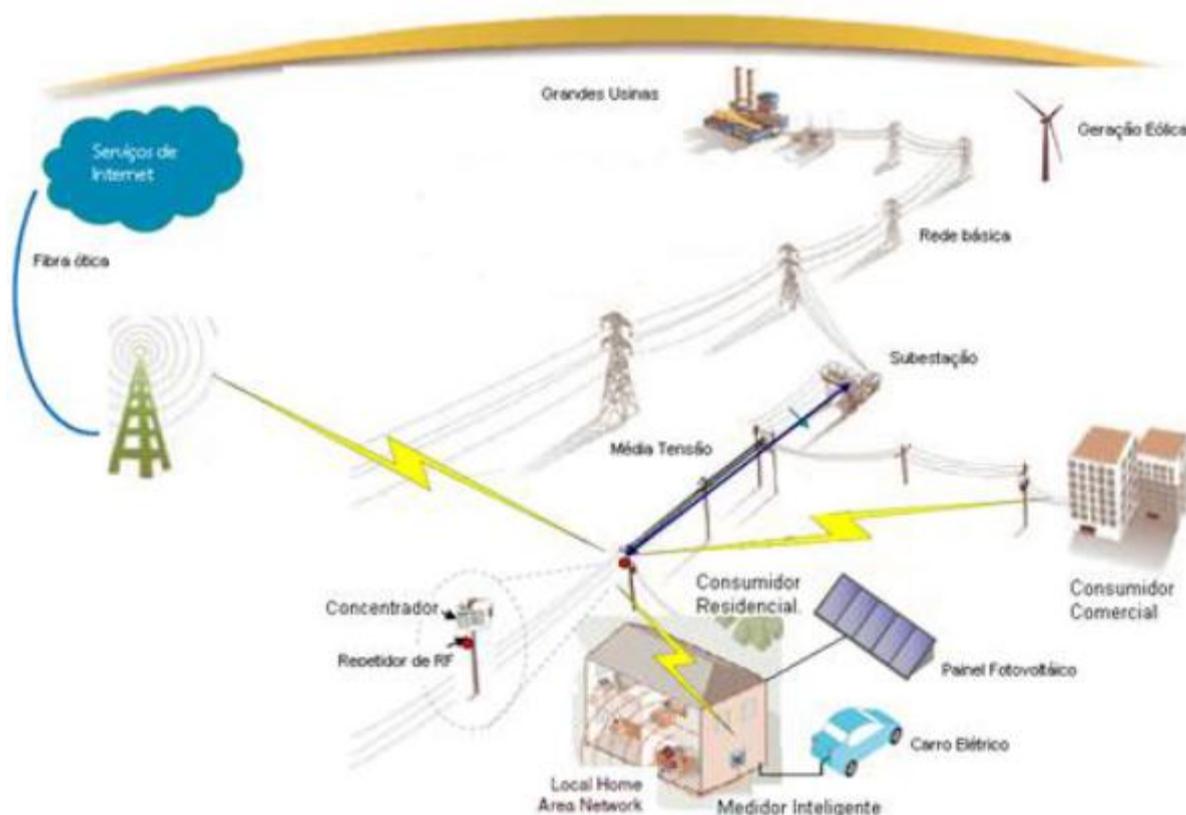


Figura 10-Topologia de Redes Inteligentes

Já existem projetos-piloto que buscam a participação do consumidor no gerenciamento e na produção de energia elétrica. A essência da implementação desses tipos de projeto é uma solução de telecomunicação que possibilite a comunicação de dados. É fundamental a presença de infraestrutura de medição avançada, que possibilite analisar os dados coletados. Outras características são importantes na expansão de redes inteligentes, porém variam de acordo com cada projeto a ser desenvolvido. São eles: reconfiguração automatizada, geração distribuída, armazenamento de energia, gestão pelo lado da demanda e veículos elétricos [9].

2.2.1.1 Telecomunicações

As tecnologias de rede de comunicação devem atender aos requisitos mínimos de atuação dos elementos de proteção e automação. As concessionárias de energia podem optar por criar sua própria rede de dados ou mesmo alugar. Há várias tecnologias que podem ser usadas no desenvolvimento de projetos-pilotos, entre elas CLP (Controlador Lógico Programável), fibra ótica, micro-ondas e também tecnologias de rede sem fio, como por exemplo, *WiMax*, *Zigbee* e *Wifi*. A necessidade de um projeto ser confiável, eficiente e robusto, leva a utilização de mais de uma tecnologia na elaboração do projeto. Isso se dá devido à localidade escolhida, que é de forma a proporcionar uma maior cobertura da área. A Figura 11 mostra a estrutura de uma rede inteligente em residências. A tecnologia *Zigbee* utilizada permite a comunicação de todos os equipamentos da rede com o medidor, através de uma rede sem fio. Por apresentar baixo custo, é comumente usado em controle sem fio e monitoramento [9] [29].

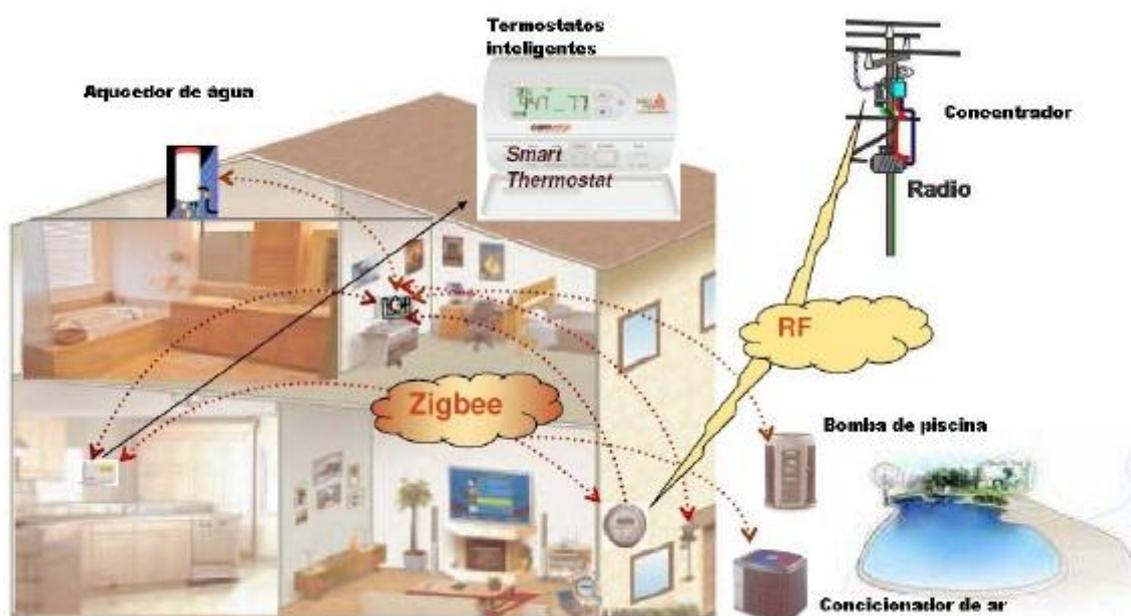


Figura 11-Tecnologia Zigbee em residências

2.2.1.2 Automação Avançada

A automação avançada possibilita aumentar a confiabilidade e disponibilidade da rede de distribuição. Pode estabelecer critérios para a correção de eventuais distúrbios e recuperação do estado operacional da rede em tempo real, expandindo os benefícios da rede. Essencialmente, os projetos-pilotos consistem em dois tipos de estrutura: centralizada e

descentralizada. Na estrutura centralizada, a aquisição de dados e informações são centralizadas, em ponto central de processamento, e enviadas para um sistema SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*). Já na estrutura descentralizada, é necessário o conhecimento prévio dos possíveis problemas que irão surgir, pois a reconfiguração é feita de acordo uma lógica previamente definida[3] [9].

2.1.2 Veículos Elétricos

Veículos elétricos são peças chaves na medida em que os recursos de combustíveis ficam escassos e a poluição aumenta. Há alguns obstáculos ainda a ser superados. O tempo de recarga não pode ser muito longo e nem muito curto, pois a demora de recarga causa indisponibilidade ao condutor, já um tempo muito curto pode sobrecarregar a rede. Em larga escala é necessário fazer estudos sobre as consequências de recarga simultânea de veículos elétricos *Plug-in* na rede. As características de armazenamento de energia elétrica possibilitam novas oportunidades para operação segura e econômica dos sistemas de energia. A Figura 12 ilustra os tempos de cargas dos veículos, em função da sua localização. Em locais em que o fluxo de pessoas é maior, há uma necessidade de que a recarga seja mais rápida [2] [19].

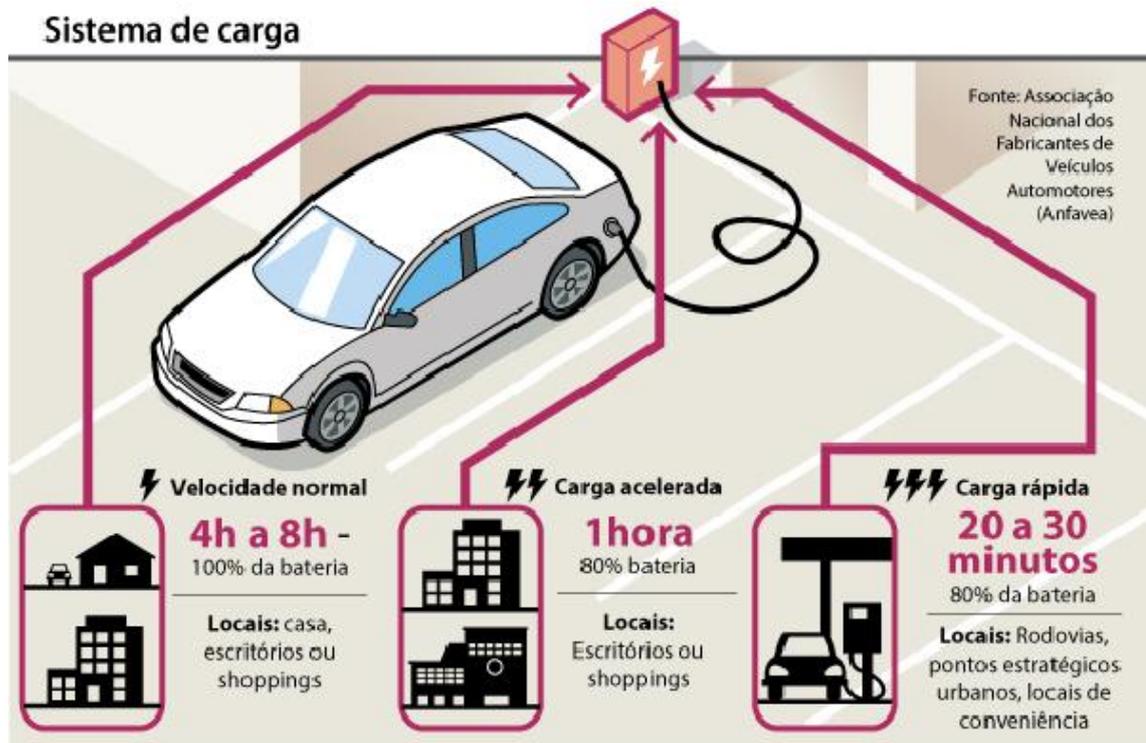


Figura 12-Sistema de carga de veículos elétricos

As redes inteligentes no mundo surgiram com o intuito, principalmente de fornecer uma energia eficiente para um planeta mais sustentável. A maioria da capacidade de energia gerada depende de combustíveis fósseis, isso de fato é um fator preocupante, pois a emissão de dióxido de carbono na atmosfera representa alterações no clima e consequências negativas para os seres humanos. A Figura 13 mostra a projeção para emissão de gás carbono ao longo de anos.

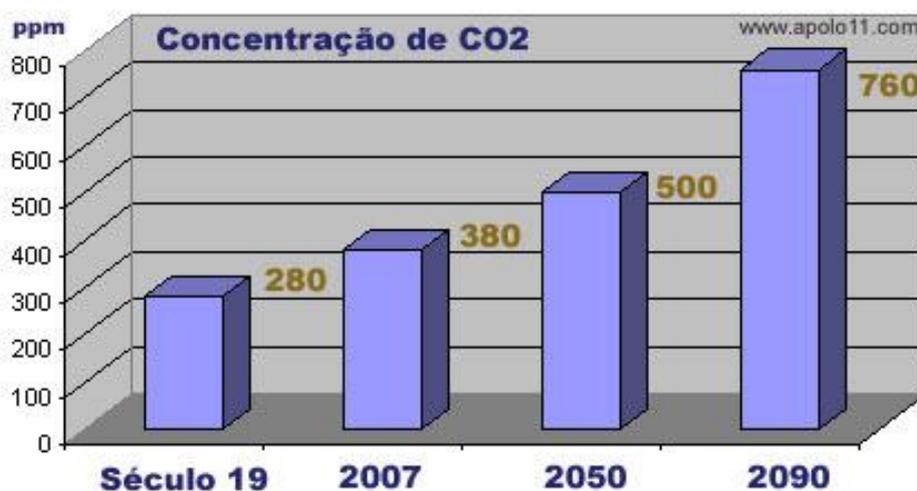


Figura 13-Concentração de CO₂

Para suprir a necessidade de reduzir as emissões de dióxido de carbono, o sistema elétrico tem que estar preparado para esse desafio, isso significa que é necessário um sistema elétrico do futuro que satisfaça os seguintes critérios: capacidade, confiabilidade, eficiência e sustentabilidade. Assim será viável satisfazer a crescente demanda de energia elétrica. Dessa forma, é possível reduzir os impactos provocados pelas emissões de dióxido de carbono adotando fontes de energia limpas e renováveis [10].

2.3 Smart Grids no mundo

No mundo, há iniciativas de vários países na implantação das redes inteligentes, porém os procedimentos de implantação, os prazos e prioridades se diferem. O termo *Smart Grid* foi utilizado pela primeira vez em 2005, em um artigo com o título “*Toward A Smart Grid*” escrito por S. Massound Amin e Bruce F. Wollenberg, publicado na revista IEEE P&E. O artigo trata da união de aplicações de elementos digitais e de comunicação nas redes de transporte, proporcionando a inserção da era digital no sistema elétrico [28][30].

2.3.1 Ásia

O Japão é um dos pioneiros no desenvolvimento de redes inteligentes, e a criação de os modelos é voltada para a comunidade e para negócios. O foco voltado para a comunidade se caracteriza no gerenciamento de sistemas de tarifas dinâmicas e resposta da demanda. Já o foco em negócios representa os investimentos financeiros para a realização dos projetos SG no país, que são providos de grandes empresas como Toyota, Mitsubishi, Toshiba, Nissan Motor, entre outras.

A China introduziu a tecnologia das redes inteligentes em 2006 com o projeto a *Solution Architecture for Energy Project (SAFT)* utilizando sensores para auxiliar na junção de equipamentos e aprimorar o nível digital, a coleta de dados e a integração de sistemas. A previsão de crescimento da demanda é de 233% entre 2007 e 2050, o que caracteriza uma urgência na implantação SG. Além disso, a China é o maior emissor de gás carbono no meio ambiente, necessitando buscar um desenvolvimento sustentável de sistema de energia [31].

2.3.2 América

Em 2007, os EUA publicaram um documento com o título “*Energy Independence and Security Act of 2007*” em que se tratava da importância de se construir uma rede inteligente que modernizasse os sistemas de transmissão e distribuição afim de manter uma infraestrutura

segura e confiável. O aumento da tecnologia digital, a implantação de “tecnologias inteligente” para medição, comunicação (referente à operação da rede) e automação de distribuição são questões tratadas neste documento [32].

Em março deste ano, a Ford iniciou a instalação de estações de recargas para veículos elétricos, junto a GE- General Electric. As primeiras estações foram instaladas na sede da Ford em Dearborn. A quantidade de estações vem crescendo em toda América do Norte; em 2009 havia 3000 estações públicas e atualmente são mais de 20000. O diferencial da Ford está no fato do seu sistema está ligado a rede, e isso permitirá a coleta de dados, como o tempo de recarga e a quantidade de dióxido de carbono não gerado, obtendo informações e um melhor planejamento para novas estações [25].

2.3.3 Europa

Desde o ano de 2007, a equipe da *The Vienna University of Technology-TUWIEN* trabalha com questões relacionadas as cidades inteligentes. Desde então, já existe mais duas versões disponíveis dessas redes, uma versão do ano 2013 e outra do ano 2014. O projeto visa cidades de médio porte e suas perspectivas para o desenvolvimento. A principal diferença entre essas versões é devido ao uso de diferentes fontes de dados e bem como melhorias na definição de indicadores. No geral, o modelo proposto é baseado na junção de seis características de forma inteligente (economia, mobilidade, ambiente, pessoas, vida e governo) para o bom desempenho de uma *Smart City*. Um ranking foi criado para classificar as cidades de acordo com essas características. Apesar de rankings utilizarem métodos e abordagens variadas, apresentam objetivos de interesse de acionistas. O que pode servir para futuras aplicações, por parte destes investidores. Atualmente existem 77 cidades que foram escolhidas para a amostra da última versão da *Smart City*[33].

2.3.4 Oceania

Smart Grid, Smart City é um projeto financiado pelo governo australiano no valor de 100 milhões de dólares, liderado pela empresa Ausgrid. O projeto avaliou diversas tecnologias de redes inteligentes, além dos benefícios e custos para implementação dessas redes no país. Estima-se que até 30mil famílias estarão inseridas no projeto entre os anos de 2010 e 2014. Ajudar as famílias a gerenciar melhor o consumo de energia, melhorar a eficiência no fornecimento de energia e diminuir a redução das emissões de gases do efeito estufa, são objetivos do projeto. O suporte aos clientes é feito através de alertas via SMS,

informando-lhes valores das taxas a serem pagas em momentos de alta demanda na rede, bem como notificações de mudanças sazonais [34].

2.3.5 África

Na África Subsaariana o consumo de energia entre os anos 2007 e 2030 tende a duplicar, pois a tendência é que as pessoas tenham cada vez mais acesso aos serviços de energia elétrica que estão cada vez mais disponíveis. Nas áreas urbanas e rurais são utilizadas as micro-redes. Esses sistemas operam de forma autônoma, conectado ou não a rede. São projetados para produzirem energia elétrica que supra a demanda de pequenas comunidades, e propõem a integração de geradores de energia distribuídos (energia solar, energia eólica, bioenergia). Recentemente foi inaugurada uma central solar de Jasper, perto de Kimberly, África do Sul. É a maior infraestrutura do continente e pode produzir 180mil MW/h de energia, o que dá para alimentar cerca de 80 mil casas [26] [31].

2.4 Smart Grids no Brasil

No Brasil há iniciativas tanto por parte do governo quanto por parte das instituições privadas, para o desenvolvimento de tecnologias ligadas às redes inteligentes. Tendo em vista que a configuração do setor elétrico atual sofrerá mudanças, e será necessário o cumprimento de normas regulamentadoras, há alguns projetos pilotos em andamento monitorados por distribuidoras de energia elétrica nacionais.

No que se diz a respeito à regulamentação e às políticas públicas, o governo através do Ministério de Minas e Energia (MME) criou um grupo de trabalho, a partir da publicação da Portaria nº 440 no dia 15 de abril de 2010, para estudar ações necessárias para implantação de redes no país. O grupo de trabalho é composto por representantes do Ministério Minas e Energia-MME, da Empresa de Pesquisa Energética- EPE, do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica-CEPEL, da Agência Nacional de Energia Elétrica-ANEEL e do Operador Nacional do Sistema Elétrico-ONS. Mais detalhes da Portaria Nº440 podem ser encontrados no Apêndice A.

Os principais motivadores no Brasil na criação de redes inteligentes é uma melhor qualidade no fornecimento de energia, uso racional, criação de oportunidades e emprego, maior informação ao consumidor, base de inovação e uma modicidade tarifária. No período de 2011-2015, O Brasil investirá um valor superior a U\$ 7,9 bilhões sendo que, a

percentagem maior será investida em medidores eletrônicos, como pode ser visto na Figura 14[12].

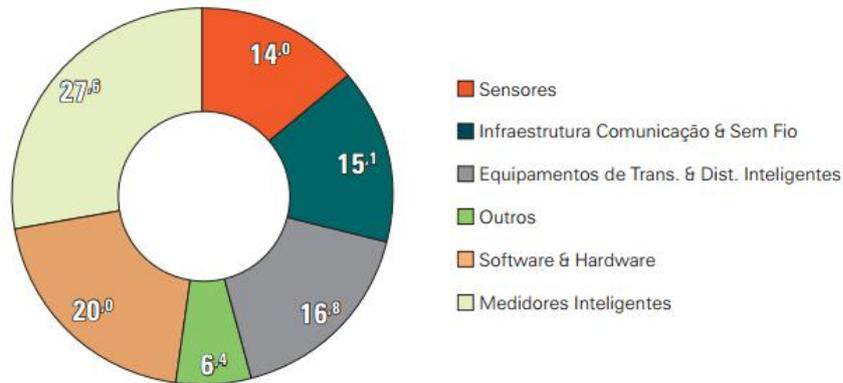


Figura 14-Previsão de investimentos em *Smart Grid* no Brasil (em%)

A produção e transmissão de energia elétrica do Brasil são por meio de um sistema de grande porte e predominantemente oriundas das usinas hidrelétricas, formando assim o SIN- Sistema Interligado Nacional. O SIN é formado por empresas de várias regiões do Brasil, englobando o Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Apenas 1,7% da energia requerida pelo país encontra-se em sistemas isolados, principalmente na região amazônica. O SIN apresenta subsistemas ligados entre si, isso proporciona a possibilidade de explorar a sazonalidade dos rios e, comutar os excedentes de energia na época de cheia em cada região [13].

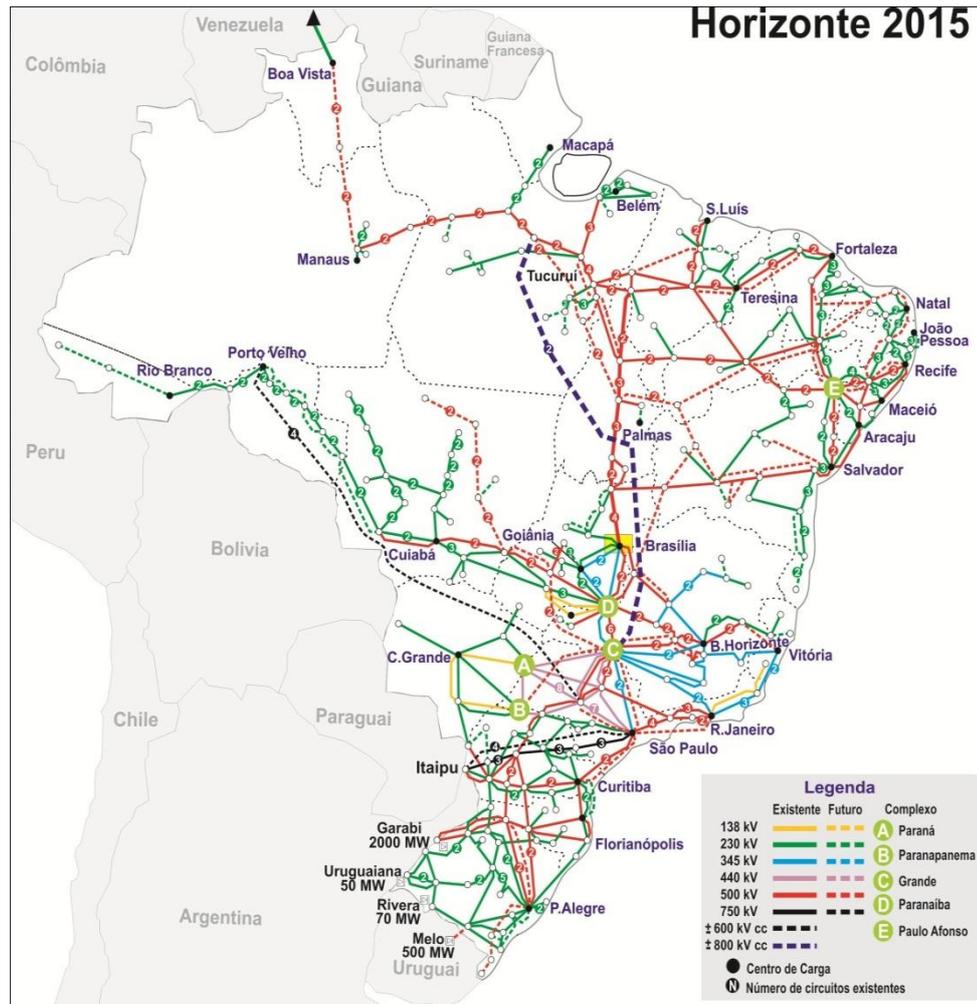


Figura 15-Mapa do Sistema Interligado Nacional Brasileiro, 2015

A Figura 15, apresenta as perspectivas até o ano 2015 na criação de novas linhas de transmissão de energia; é possível notar que a região nordeste será beneficiada principalmente com linhas de 550kV.

Os projetos pilotos utilizando redes inteligentes no Brasil já estão na fase desenvolvimento e/ou operação. Esses projetos buscam soluções que atendam a demanda da sociedade e também uma migração do setor elétrico atual, para adoção plena das redes inteligentes em todo país. Porém é um processo lento e demorado, já que depende de muitos fatores. Entre os principais projetos, temos [14]:

- **Cidades do Futuro:** Projeto da Cemig, desenvolvido na cidade de Sete Lagoas-MG. Com um investimento de 50 milhões, foi lançado no ano de 2009 e a previsão de conclusão é para este ano. Em 2011 possuía 3,8 mil medidores inteligentes em operação, e a previsão para este ano é de 8 mil medidores.

- *Smart Grid* em São Paulo: Lançado no ano de 2007, é um projeto desenvolvido pela empresa AES Eletropaulo, com investimento previsto de R\$ 71,2 milhões, pretende-se instalar cerca de 60 mil medidores inteligentes na região metropolitana de São Paulo até o ano 2015.
- Cidade Inteligente de Búzios: Iniciativa do Grupo Enel com a Ampla, o projeto busca transformar a cidade de Búzios em uma “Cidade Inteligente”, com investimento de R\$ 40 milhões. A previsão de término do projeto é para este ano. Búzios é uma cidade pequena, o que facilita na implantação das redes inteligentes, porém apresenta um consumo muito alto de energia elétrica.
- InovCity: É uma parceria entre a Ecil Energia e a EDP Bandeirante, que busca transformar a cidade de Aparecida-SP em uma rede mais sustentável e eficiente. Tendo um investimento de R\$ 10 milhões, e uma previsão de 15,4 mil medidores inteligentes a serem instalados. Esse projeto foi lançado em 2011.

Atualmente, no projeto Cidades do Futuro, a CEMIG utiliza um Sistema de Medição Fasorial Sincronizado-Sismef para aprimorar a medição do módulo e do ângulo das grandezas elétricas tensão e corrente de forma instantânea, facilitando o controle de informações em sistemas elétricos geograficamente distantes entre si. Com esse sistema de medição a CEMIG visa obter informações técnicas para o monitoramento e controle do SEP, proporcionando ganhos, sobretudo em questões voltadas à operação do sistema elétrico. Assim, contribuirá para o aumento na qualidade de energia entrega aos seus clientes [11].

3 *A junção: Qualidade de Energia Elétrica e Smart Grids*

A qualidade de energia ainda será um problema no futuro nas redes inteligentes?

Segundo Bollen *et al.*[17], a qualidade de energia é um dos novos desafios na transição para as redes inteligentes. Além da possibilidade de novos distúrbios devidos aos equipamentos conectados à rede, outros problemas irão surgir nesse novo cenário. Por exemplo: a utilização de painéis solares ligadas a redes de baixa tensão tem como consequência o surgimento de sobretensões, a frequência de comutação dos conversores presentes em turbinas eólicas provocam sinais de alta frequência que fluem na rede, o aparecimento de harmônicos devido aos carregadores de veículos elétricos, e o efeito de cintilação que provem da partida repetida de bombas de calor. A qualidade de energia e a confiabilidade serão importantes na avaliação de desempenho nas redes inteligentes.

A avaliação de desempenho nas SGs apresenta um foco baseado em fontes renováveis, sobretudo voltada para a geração distribuída. O termo capacidade de hospedagem (do inglês “*hosting capacity*”) está ligado às questões relacionadas à GD, um tanto importante para as diversas áreas do SEP- Sistema elétrico de potência. Pode ser definida como a quantidade máxima de geração dispersa que pode ser suportada pela rede de um ponto específico de sistema de distribuição. Na área de qualidade de energia, uma análise da capacidade de hospedagem leva a índices de desempenho aceitáveis sobretensão, subtensão, sobrecarga de corrente, harmônicos, etc [18].

Os indicadores de qualidade podem limitar a quantidade máxima de GD que pode ser conectado ao sistema. Na Figura 16 é possível observar que a medida que a quantidade de GD aumenta, o índice de desempenho cai, o que significa que há uma quantidade limite de GD de forma que não tenha deterioração no sistema elétrico. A partir do índice de desempenho é possível determinar a capacidade de hospedagem[18].

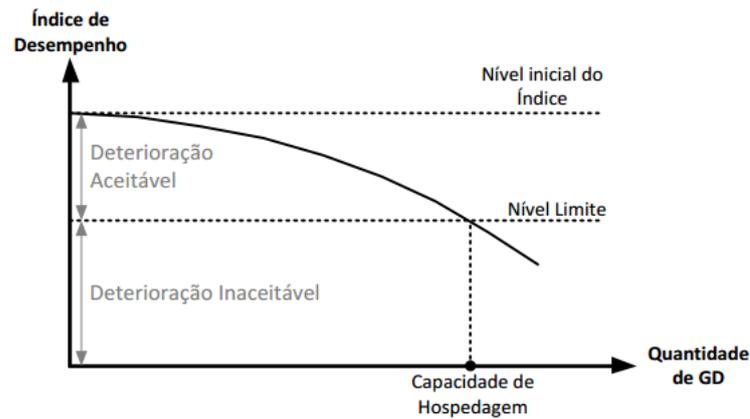


Figura 16-Índice de desempenho versus quantidade de geração distribuída

A GD traz vários benefícios, pelo fato de ser uma geração que está localizada próxima a carga, representando a inserção de novas tecnologias no mercado, reduzindo o custo da energia produzida. Desta forma, será possível que as distribuidoras e os consumidores detenham informações importantes, como consumo, geração e problemas na rede. Estas informações poderão ser obtidas através dos instrumentos de medição, tais como: relés de proteção, medidores inteligentes, registradores de faltas. [15].

No entanto o controle da QE normalmente é feito, utilizando analisadores portáteis, sendo que muitas vezes essas medições são feitas somente após o aparecimento de distúrbios na rede. O não conhecimento da distribuidora de energia por parte dessas irregularidades, antes mesmo de qualquer reclamação do cliente, pode acarretar prejuízos sem necessidade, no contexto do mercado de energia. As características de observabilidade e a controlabilidade são necessárias nas redes inteligentes para o controle de fluxo de energia. Isso significa que a partir apenas das saídas do sistema e das ações realizadas em toda a sua configuração é possível determinar o seu comportamento[15] [16].

Existem vários sistemas que são bases para o futuro das redes inteligentes e estão presentes em todo mundo, tais como: *Supervisory Control and Data Acquisition*(SCADA), *Automated Meter Reading/Advanced Metering Infrastructure* (AMR/AMI)e *Meter Data Management* (MDM) [15] [28].A Figura 17 mostra estrutura de uma rede de comunicação para automação do controle de uma subestação e medidores eletrônicos. Os dispositivos remotos são representados pelos sensores, controladores e disjuntores. O transformador é ligado através de rede sem fio ou com fio, em caso de falha de uma das conexões é necessário manter o funcionamento da rede. No Centro de Monitoramento e Controle as principais

ferramentas de base para o monitoramento e controle da rede, são os sistemas SCADA, AMI e o ERP (Sistema de Gestão Integrado).

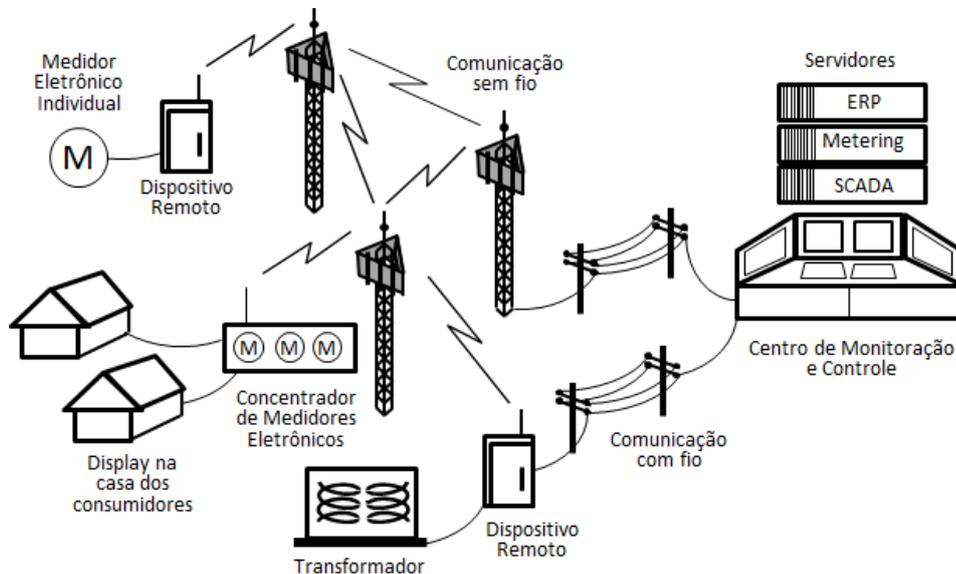


Figura 17-Princípio da arquitetura de redes inteligentes- supervisão e medição

O MDM, por exemplo, é um sistema de gerenciamento de dados de medição presente na rede de distribuição que adquire dados a partir dos medidores eletrônicos. Nesses sistemas utilizam-se normalmente as redes *Mesh*, devido à necessidade de abranger grandes áreas geográficas. Essas redes são redes em malha sem fio autoconfiguráveis que ligam um conjunto de nós fixos capazes de rotear entre si, sem a necessidade de um ponto de acesso central controlando toda a comunicação, permite aos elementos da rede formar uma malha para transmitir dados. O uso dessa tecnologia se dá devido ao baixo custo, fácil implantação e tolerantes a falhas [28].

Os medidores eletrônicos instalados na rede junto à infraestrutura de comunicação adequada, oferecendo possibilidades de modernização entre distribuidora e consumidor. A infraestrutura de comunicação é composta basicamente por quatro componentes: distribuidora, concentrador, medidor e equipamentos domésticos. Os concentradores são hierarquizados de forma que existe um concentrador principal que acumula informações dos concentradores secundários, comunicando assim com a concessionária. Os concentradores secundários obtêm os dados dos medidores eletrônicos que utilizam tecnologias PLC ou de radiofrequência para se comunicar com os equipamentos domésticos. A Figura 18 ilustra esse tipo de arquitetura[28].

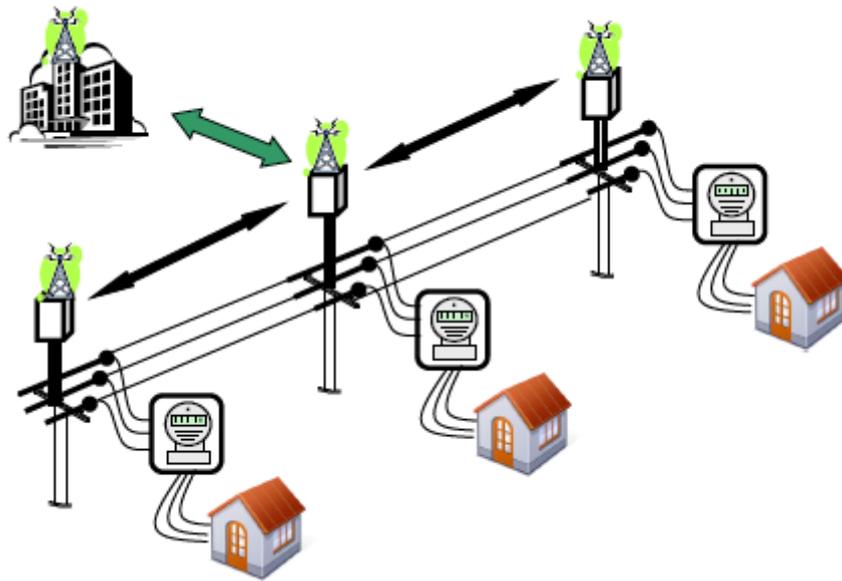


Figura 18-Concentradores hierarquizados em uma rede tipo Mesh

A comunicação entre os equipamentos possui requisitos variados. Visto que isso acontece, padrões e protocolos de comunicação são propostos para assegurar a interoperabilidade, como por exemplo, IEC 61850, DNP3 (*Distributed Network Protocol Version 3*)[35].

No Brasil, a utilização de medidores inteligentes que atentam as normas relacionadas ao sistema de distribuição elétrica (PRODIST) permite o controle da qualidade, condicionamento e estabilidade do sistema. Isso é feito através do monitoramento do fator de potência, harmônicos, desequilíbrios de tensão, entre outros distúrbios relacionados a qualidade de energia[35].

Segundo Carnieletto[27], uma dificuldade para maioria dos MDMs é realizar o processamento de grandes quantidades de intervalos de dados de medição, visto que em redes inteligentes haverá uma concentração de massa de dados. Ou seja, problemas de processamento dados de faturamento, comandos bidirecionais, eventos como falha no fornecimento e/ou tentativa de fraude afetaram nos indicadores de qualidade de energia.

É possível, através de algoritmos matemáticos de redes neurais artificiais —RNAs—, realizar decisões rápidas em respostas a variação de sistema, atuando em tempo real. Assegurar que o sistema comunique-se de forma transparente, ou seja, trocando informações e coordenando tarefas segundo uma lógica de programação das RNAs, garantindo interoperabilidade [35].

A GD e as redes inteligentes irão mudar a arquitetura dos sistemas de energia. A desregulamentação de alguns segmentos do setor elétrico faz com que a inserção de novos agentes interfira na tomada de decisão, o que facilita oferecer serviços diferenciados para os clientes, com preços acessíveis, mantendo um os padrões de qualidade [37].

Nota-se, de uma maneira geral, que a junção QEE e SG não será uma tarefa fácil para pesquisadores e operadores do sistema elétrico. Mas, desde já, deve-se ter preocupação com esse tema, visto que a implantação dessas novas redes inteligentes é a tendência no futuro. Dessa forma, para melhor contextualização do tema, a seguir será exposto dois projetos pilotos, um na Noruega e outro na Colômbia, afim de contextualizar os problemas de qualidade energia que surgiram nas redes inteligentes. A inexperiência com novas tecnologias é um foco nos sistemas de energia elétrica em SG, visto que as tecnologias da informação e telecomunicação oferecem a possibilidade de integração de diferentes recursos.

3.1 Projetos Pilotos

3.1.1. Noruega

A Noruega começou a implementar as redes inteligentes juntamente com o regulador “*The Norwegian Water Resources and Energy Directorate-NVE*”, que é o centro nacional de competência para Hidrologia na Noruega. As novas regras que preveem a inserção em larga escala de medidores inteligentes foram aprovadas em 24 de junho de 2011. A expectativa é que os medidores sejam instalados até 01 de janeiro de 2017. A fim de enfrentar os novos desafios no desenvolvimento das *Smart Grids* foi criado um centro chamado de “*The Norwegian Smart Grid Center- NSGC*”, que tem como objetivo contribuir para um sistema de energia segura, eficiente e sustentável[36].

O NSGC desenvolve sites nacionais de tecnologias de redes inteligentes, além de criar laboratórios e locais de demonstração em larga escala, oferecendo oportunidades para indústrias e fornecedores testes seus produtos sob condições realistas. O mercado norueguês avalia a tecnologia *Smart Metering* como aliado nas questões voltado para um consumo mais eficiente e uma boa gestão dos sistemas de energia. O desenvolvimento das redes inteligentes é dependente de um uma política de governo, comportamento e necessidade do cliente e as mudanças na indústria e tecnologia[36][38].

Os medidores inteligentes além de medir o consumo, têm a capacidade de processar e armazenar, viabilizando a troca de informações em tempo real. Esses equipamentos possuem circuitos e dispositivos baseados em semicondutores, podendo ser sensíveis a surtos de tensões presentes no sistema de distribuição[40].

Em um dos projetos pilotos a tecnologia de comunicação entre residências através de fibras óticas tem sido aplicada, comumente conhecida por “*fiber-to-home*”. Esta tecnologia é usada devido à facilidade de empresas norueguesas já possuírem operações de telecomunicação fundamentadas em fibras óticas. Um dos pontos a serem testados nesta primeira fase do projeto foram as diferentes tecnologias de comunicação que visa criar conhecimento necessário para que se selecionem tecnologias adequadas em larga escala[36].

O caminho de comunicação pode ser feita do medidor de modo direto para o “*Head End System*” ou através de um concentrador. O “*Head End System*” é uma junção de software e hardware que recebe dados do medidor e são enviados a utilitários via AMI. A Tabela 2 mostra o tempo de resposta de resposta para diferentes tecnologias, utilizando duas configurações.

Os testes de comunicação revelaram que a tecnologia “*Radio Mesh*” pode apresentar desempenho variado, devido a dificuldade de alcançar medidores sem a utilização de uma antena externa [28]. O “hop” representa o “salto” que o sinal a ser enviado fará antes do seu destino final. É possível observar que à medida que o número de “hops” aumenta na tecnologia utilizada entre o medidor e o concentrador, o tempo de resposta do medidor também aumenta. E quando a comunicação é feita com uma frequência de 868MHz, este tempo de resposta torna-se consideravelmente grande. As tecnologias Wi-fi e de fibra, mostraram um tempo de resposta rápido, em relação às outras tecnologias.

Tabela 2-Tempo de resposta de um medidor inteligente na solicitação de dados

	Tecnologia		Tempo (s)
Medidor >>>HES	GPRS		10-30
	EDGE		8-30
	Tecnologia Medidor-Concentrador	Tecnologia Concentrador- HES	
Medidor>>> Concentrador>>>HES	RM433MHz- 1'hop'	GPRS	7
	RM433MHz-2 'hops'	GPRS	8
	RM433MHz- 3'hops'	GPRS	9
	RM433MHz- 4'hops'	GPRS	11
	RM886MHZ	GPRS	30-35
	RM886MHZ	EDGE	12-15
	Wifi	Fibra	< 2

Em redes inteligentes a aplicação de redes sem fio é utilizada em situações que demandam transmissões de taxa de dados elevadas, caracterizando uma faixa de frequência exclusiva, devido apresentar requisito com alto nível de confiabilidade.

É importante frisar que a padronização da tecnologia utilizada nas SG, proporcionam uma maior garantia da interoperabilidade do sistema e competição entre os integrantes do mercado[28].

A *SINTEF Energy Research*, que é uma organização de pesquisa na região da Noruega, realizou teste em cinco medidores inteligentes para verificar a capacidade de medição da qualidade de energia. Os testes foram focados nos seguintes fenômenos: precisão

na medida de tensão, registro nas interrupções, registro de flutuações de tensão e menor tensão funcional (é o nível de tensão que o medidor pára de funcionar). A empresa constatou que as medidas não estão segundo a norma EM 50160 aplicáveis à qualidade de energia do país, apresentando limitações nas medições. Sendo assim, faz-se necessário que os fornecedores disponibilizem aos usuários manuais de funcionalidades dos equipamentos. Desta forma, todas as limitações dos aparelhos serão levadas em conta no momento da realização dos testes, o que elevará a qualidade dos dados obtidos[41].

3.1.2. Colômbia

No ano de 2012 a Colômbia ainda não apresentava uma estrutura adequada para interligação de redes inteligentes e geração distribuída em redes de distribuição. Um projeto piloto foi desenvolvido na *Universidad Nacional de Colombia*. A rede piloto constitui em sistema de baixa tensão (208/120V) ligada a rede de distribuição, da *Universidad Nacional de Colombia*, contendo duas fontes de geração distribuída: uma fotovoltaica e um gaseificador, com potência de 4.6kWp e 15kW, respectivamente.

Na Figura 20 tem-se a rede piloto, e elementos tais como: inversor DC/AC, quadro de distribuição com medidores bidirecionais, cargas representadas por computadores, entre outros. Tais elementos são essenciais no contexto de redes inteligentes, vista a necessidade do uso eficiente da energia e aumentando flexibilidade do sistema. A presença de medidores inteligentes é fundamental no monitoramento dos fluxos de energia, devido à presença da GD na rede.

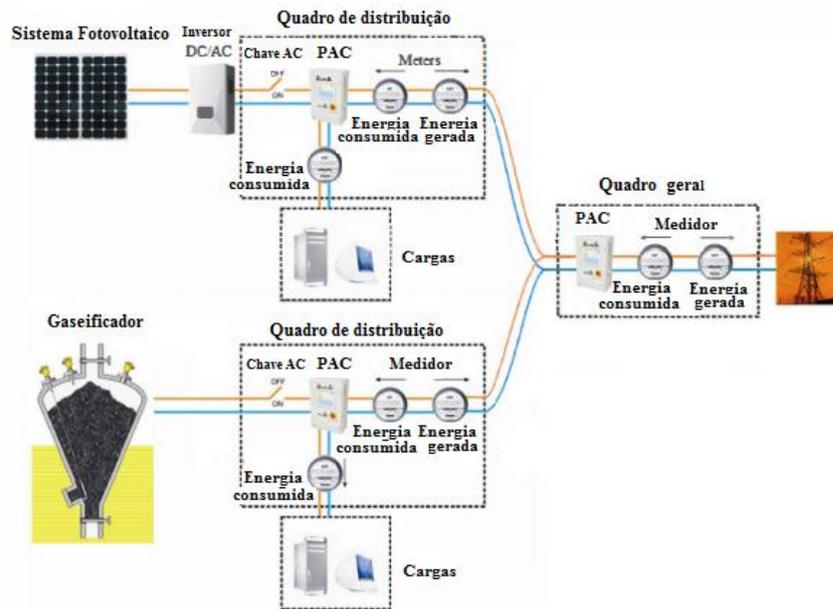


Figura 20-Projeto piloto de uma rede inteligente na rede de distribuição da Colômbia

No sistema fotovoltaico é utilizado um inversor de energia, que conecta a saída DC da fonte para a rede elétrica AC. O inversor pode ser tido também como um conversor de energia e que possui as funções de controle, proteção e filtragem. Já no processo de gaseificação consiste na queima de matéria vegetal a altas temperaturas na presença de um agente oxidante (ar, oxigênio, vapor d'água)[37].

A utilização de inversores de baixa qualidade na conexão de painéis solares fotovoltaicos provoca o aparecimento de harmônicos de baixa ordem na rede de distribuição, isso ocorre devido a utilização dos dispositivos de eletrônica de potência, que são extremamente sensíveis a distorções na forma de onda da tensão[39].

As distorções harmônicas decorrentes da integração da GD têm relação com os equipamentos utilizados na conexão com a rede. O aparecimento dessas distorções depende de vários elementos, tais como impedância da rede, níveis de tensão da rede de distribuição, potência de curto-circuito no ponto de conexão ou do tanto de capacitância acrescentada na rede. É possível fazer uma análise da quantidade máxima de GD que pode ser ligada a rede sem que extrapole o limite de distorção harmônica, como mostrado na Figura 21[18][39]. Isso demonstra o quanto a integração de redes inteligentes poderá afetar a qualidade de energia, visto que a GD será de suma importância nessas redes no futuro.

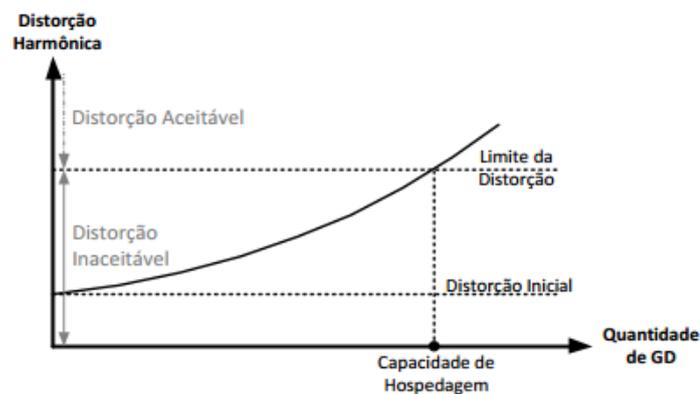


Figura 21-Distorção Harmônica versus quantidade de geração distribuída

A regulação de tensão é outro problema a ser considerado na GD. Painéis fotovoltaicos e geração eólica ao injetarem potência ativa na rede, pode causar elevação nos níveis de tensão, sendo assim há uma necessidade de desenvolver sistemas mais flexíveis e sofisticados de formar a avaliar as sobretensões e os impactos provocados nos integrantes da rede, principalmente nos consumidores[39]. Com isso, será necessário rever aspectos como elevação de tensão (*"voltage swell"*) e outros distúrbios no estudo de qualidade de energia, quando as redes inteligentes se tornarem cada vez mais presentes.

4 *Considerações Finais*

Em virtude dos fatos mencionados, ao longo do estudo, foi possível verificar que os fenômenos de distúrbios elétricos associados à má qualidade de energia estão presentes nas redes inteligentes, pois a complexidade das *Smart Grids* é cada vez maior.

Além disso, as principais tendências das redes inteligentes está ligada a grandes investimentos voltados para as áreas de tecnologia da informação e comunicação, controle e automação de sistemas e regulamentação que garanta uma interoperabilidade no sistema. Pois essas áreas estão em constante evolução, e o processo de regulamentação demanda tempo para ser elaborado.

Foi possível perceber que um dos principais problemas de qualidade de energia nas redes inteligentes, está associada a inserção de novas fontes renováveis, uma vez que, este tipo de geração injeta distorções harmônicas sendo prejudicial para os sistemas elétrico, necessitando um controle nos índices relacionadas à esses distúrbios. No caso da geração de energia solar, é necessário o desenvolvimento de inversores à um custo viável e de boa qualidade, pois normalmente os inversores são os equipamentos utilizados na interface de conexão destes painéis.

Apesar da existência dos problemas de qualidade de energia nas redes inteligentes tais como: variações de tensão, desequilíbrios de tensão, distorções harmônicas e flutuações de tensão; as *Smart Grids* trarão muitos benefícios para o sistema elétrico, aumentando a qualidade nos vários níveis de tensão e estabilidade do sistema, além de proporcionar uma maior segurança e uma visão ampla de todos os processos da rede.

Por fim, com a crescente necessidade de evolução das redes inteligentes, o planejamento sistêmico para sua implantação se faz necessário visando a redução de problemas de qualidade. Ferramentas como a utilização técnicas de modelagem computacional e a realização destes mais precisos além do desenvolvimento de novos equipamentos mais sensíveis à presença de distúrbios são outras opções viáveis para a redução dos problemas de qualidade na rede. Desta forma, será possível o reduzir as perdas ao longo das linhas de transmissão, diminuir os custos operacionais, melhorar a qualidade de serviço oferecido pelas distribuidoras e promover a sustentabilidade do setor elétrico de forma mais produtiva.

Referências Bibliográficas

- [01] R.C. Dugan, M. M. (202). *Electrical Power Systems Quality*(2 ed.). McGraw-Hill.
- [02] E. Grzeidak, J. C. (s.d.). *Qualidade de Energia Elétrica*. Acesso em 01 de 09 de 2014, disponível em http://www.osetoelettrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed68_fasc_smart_grids_cap4.pdf
- [03] Falcão, D. M. (s.d.). "Smart Grids e Microredes: O Futuro já é Presente".
- [04] Campos, J. C. (30 de Julho de 2001). Estratégias de Conservação e Qualidade de Energia Aplicadas na Indústria. *Universidade Estadual de Campinas*.
- [05] Mehl, E. L. (s.d.). *Qualidade de Energia*. Acesso em 12 de 11 de 2014, disponível em <http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/downloads/qualidade-energia.pdf>
- [06] Sacramento, R. N. (s.d.). Estudo de Qualidade de Energia Elétrica de um Transformador trifásico em um Sistema Elétrico Industrial. *Universidade Federal de Viçosa*.
- [07] Silva, S. R. (Agosto de 2013). *Variações e Flutuações de Tensão*. Fonte: www.cpdee.ufmg.br/~selenios/variacao.htm
- [08] *IEA-Smart Grids Technology Roadmap*. (s.d.). Fonte: International Energy Agency: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/smartgrids_roadmap.pdf
- [09] Luiz Carlos Neves, A. B. (2013). *Os desafios da implementação dos projetos-pilotos de smart grid no Brasil*. Fonte: CPqD: http://www.cpqd.com.br/cadernosdetecnologia/Vol9_N1_jan_jun_2013/pdf/artigo2.pdf
- [10] *ABB no Brasil*. (s.d.). Acesso em 20 de 11 de 2014, disponível em <http://www.abb.com/cawp/db0003db002698/780471154ea9178ec12576e40047e608.aspx>
- [11] *CEMIG-Companhia Energética de Minas Gerais S.A.* (s.d.). Acesso em 24 de 10 de 2014, disponível em http://www.cemig.com.br/ptbr/A_Cemig_e_o_Futuro/sustentabilidade/nossos_programas/Redes_Inteligentes/Paginas/iniciativas_relacionadas_as_redes_inteligentes.aspx
- [12] Antônio Carlos Bordeaux Rego, C. d. (2012). *Relatório de acompanhamento setorial smart grid*. Brasília.
- [13] *ONS-Operador Nacional do Sistema Elétrico*. (s.d.). Acesso em 24 de 10 de 2014, disponível em http://www.ons.org.br/conheca_sistema/o_que_e_sin.aspx
- [14] Marcos Vinicius Nunes Arruda, R. d. (2013). Implementação de Projetos Smart Grid no Brasil. Cuiabá, MT.
- [15] M. Music, A. B. (2012). "Integrated power quality monitoring systems in smart distribution grids". *Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON), IEEE 2012 Internacional*, 501-506.
- [16] José María Romero Gordon, J. M. (2011). Design Aspects for large PQ Monitoring System in future Smart Grids. *Energia Reunião Geral da Sociedade de 2011 IEEE*, 1-8.
- [17] Math H. J. Bollen, S. B. (2014). Is there a Place for Power Quality in the Smart Grid. *Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2014 IEEE 16th International Conference on*, 713-717.
- [18] Ivan Nunes Santos, L. E. (2014). Calculando a capacidade de hospedagem da rede com vistas à inserção de geração distribuída no tocante às distorções harmônicas. Uberlândia, MG.
- [19] Zhiyoung, G. (2014). Reflections on the Development of Electric Vehicles in the Smart Grid. *Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 2014 IEEE Conference and Expo*, 1-3.

- [20]Geraldo Rocha, R. B. (Junho de 2010). *Monitoramento de motores assíncronos*. Acesso em 18 de Novembro de 2014, disponível em <http://www.osetoreletrico.com.br/web/component/content/article/57-artigos-e-materias/376-monitoramento-de-motores-assincronos.html>
- [21]Resolução Normativa nº602/2014. (1 de Dezembro de 2012). *PRODIST- Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional*. Acesso em 18 de Novembro de 2014, disponível em Aneel-Agência Nacional de Energia Elétrica: http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8_Revis%C3%A3o_4.pdf
- [22]Martinho, E. (s.d.). *Leonardo Energy*. Acesso em 19 de Novembro de 2014, disponível em http://www.leonardo-energy.org.br/wp-content/uploads/2011/04/Qualidade_Energia_conceito_Leonardo-Edson2.pdf
- [23]Cassiolato, C. (18 de Outubro de 2012). *Smar-Líder em Automação Industrial*. Acesso em 18 de Novembro de 2014, disponível em <http://www.smar.com/brasil/artigo-tecnico/emi-interferencia-eletromagnetica-em-instalacoes-industriais-e-muito-mais>
- [24]Malta, P. L. (2011). Estudo da Qualidade de Energia no acionamento de Máquinas Elétricas no SAAE de Viçosa. Viçosa.
- [25]*Rede Inteligente*. (26 de Março de 2014). Acesso em 22 de Novembro de 2014, disponível em <http://www.redeinteligente.com/2014/03/26/ford-inicia-instalacao-de-recarga-para-veiculos-eletricos-nas-unidades-dos-eua/>
- [26]GREENSAVERS. (25 de Novembro de 2014). *Maior central solar da África já está em funcionamento*. <http://www.redeangola.info/primeiro-projecto-google-de-energia-solar-em-africa/>.
- [27]Carnieletto, R. (8 de Agosto de 2011). *Rede Inteligente*. Acesso em 24 de Novembro de 2014, disponível em <http://www.redeinteligente.com/2011/08/08/transformando-dados-de-smart-grid-em-informacao-util/>
- [28]Ministério Minas e Energia. (2011). *Smart Grid- Grupo de Trabalho de Redes Elétricas Inteligentes*.
- [29]Wikipédia. (s.d.). Acesso em 24 de Novembro de 2014, disponível em Zigbee: <http://pt.wikipedia.org/wiki/ZigBee>
- [30]Gilson Paulillo, P. R. (s.d.). *O Setor Elétrico*. Acesso em 26 de Novembro de 2014, disponível em Aspectos da qualidade da energia elétrica no contexto das redes inteligentes: http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/ed-93_Fasciculo_Cap-X-Qualidade-de-energia.pdf
- [31]Silva I. N., S. D., & Flauzino R. A., S. F. (2014). Study on the Emergence and Expansion of Grids in Divergent Cities. *Transmission & Distribution Conference and Exposition - Latin America (PES T&D-LA), 2014 IEEE PES*, 1-5.
- [32]Ferreira, M. C. (Julho de 2010). Perspectivas e Desafios para Implantação das Smart Grids: um estudo de caso dos EUA, Portugal e Brasil.
- [33]TUWIEN-Technische Universitat Wien. (s.d.). Acesso em 24 de Novembro de 2014, disponível em europeansmartcities: <http://www.smart-cities.eu/>
- [34]Ausgrid. (s.d.). Acesso em 24 de Novembro de 2014, disponível em smartgrid smartcity: <http://www.smartgridsmartcity.com.au/>
- [35]S. G. Tomasin, B. F. (Outubro de 2014). UNIFEI. *Smart Grid- Uma visão geral com enfoque em condicionamento e qualidade de energia elétrica*.
- [36]K. Sand, J. Foosnaes, D. E. Nordgard, V. Kristoffersen, T. B. Solvang, D. Wagen. (2013). Experiences From Norwegian Smart Grid Pilot Projects. *Electricity Distribution (CIRED 2013), 22nd International Conference and Exhibition on*, 1-4.
- [37]J. Hernandez, L. E. Luna. (2012). Design and installation of a smart grid with distributed generation. A pilot case in the Colombian networks. *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2012 38th IEEE*, 565-569.

- [38]GSGF- *Global Smart Grid Grid Federation*. (s.d.). Acesso em 18 de Novembro de 2014, disponível em <http://www.globalsmartgridfederation.org/smart-grids/>
- [39]G. Paulillo , P. Ribeiro. (s.d.). *O setor elétrico*. Acesso em 28 de Outubro de 2014, disponível em <http://www.osetoreletrico.com.br/web/a-revista/edicoes/1115-capitulo-x-aspectos-da-qualidade-de-energia-eletrica-no-contexto-das-redes-inteligentes.html>
- [40]Ferreira, J. B. (6 de Julho de 2012). Análise de Formas de Medição de Consumo de Energia Elétrica no Setor Residencial.
- [41]T. Solvang, L. A. (2010). Power Quality Measurement Capabilities od "Samrt" Energy Meter. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality-(ICREPQ'10)*, 13-15.

Apêndice A –

A.1 Portaria Nº440, de 15 de abril de 2010

O MINISTRO DE ESTADO DE MINAS E ENERGIA, no uso da atribuição que lhe confere o art. 87, parágrafo único, inciso IV, da Constituição, resolve:

Art. 1º Criar Grupo de Trabalho com o objetivo de analisar e identificar ações necessárias para subsidiar o estabelecimento de políticas públicas para a implantação de um Programa Brasileiro de Rede Elétrica Inteligente - “Smart Grid”, abordando, principalmente, os seguintes aspectos:

I - o estado da arte de programas do tipo “Smart Grid”, no Brasil e em outros países;

II - proposta de adequação das regulamentações e das normas gerais dos serviços públicos de distribuição de energia elétrica;

III - identificação de fontes de recursos para financiamento e incentivos à produção de equipamentos no País; e

IV – regulamentação de novas possibilidades de atuação de acessantes no mercado, o que inclui a possibilidade de usuários operarem tanto como geradores de energia (geração distribuída) quanto consumidores.

Art. 2º O Grupo de Trabalho será composto por representantes do Ministério de Minas e

Energia - MME, da Empresa de Pesquisa Energética - EPE, do Centro de Pesquisas de

Energia Elétrica - CEPREL, da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL e do Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS.

§ 1º O MME será representado por servidores da Secretaria de Energia Elétrica, da Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético e da Assessoria Econômica.

§ 2º Os membros do Grupo de Trabalho serão indicados pelos Titulares dos Órgãos e Entidades participantes, cabendo à coordenação do referido Grupo ao representante da Secretaria de Energia Elétrica.

Art. 3º Na condução das suas atividades, o Grupo de Trabalho poderá convidar representantes de outros Órgãos e Entidades que, por terem atuação em áreas afins, possam oferecer contribuições às questões inerentes às atividades a serem desenvolvidas.

Parágrafo único. Eventuais despesas com diárias e passagens dos membros efetivos do Grupo de Trabalho correrão à conta dos Órgãos e Entidades que representam.

Art. 4º O Grupo de Trabalho terá o prazo de até cento e oitenta dias, a contar da publicação desta Portaria, para a conclusão das suas atividades e de até mais trinta dias para apresentação de relatório técnico contemplando os estudos, as análises e as propostas de medidas a serem adotadas.

Parágrafo único. O apoio administrativo necessário ao Grupo de Trabalho será de responsabilidade da Secretaria de Energia Elétrica.

Art. 5º Esta Portaria entra em vigor na data da sua publicação.

MÁRCIO PEREIRA ZIMMERMANN

Este texto não substitui o publicado no D.O.U. de 16.04.2010.