



XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

O Uso de Redes de Distribuição como Meio de Comunicação e sua Aplicação no Sistema de Medição Centralizada

Cesar Jorge Bandim	Fabio Cavaliere de Souza	Marcos Riva Suhett
CEPEL	CEPEL	CEPEL
bandim@cepel.br	cavalier@cepel.br	marcosrs@cepel.br

Palavras-chave

Redes como meio de comunicação

Sistemas de Medição Centralizada

Sistema de Telecomando Centralizado

Automação da Distribuição

Resumo

Este artigo relata a experiência do CEPEL no uso de redes de distribuição como meio de comunicação de dados (Power Line Communications – PLC). Aborda de forma resumida os desafios técnicos que surgem ao se optar pelo uso destas tecnologias. O artigo detalha os ensaios realizados que validam a aplicação da tecnologia PLC no Sistema de Medição Centralizada (SMC) desenvolvido pelo CEPEL, particularmente para as funções de coleta das informações de faturamento e de conexão/desconexão remota das unidades consumidoras. É proposta ainda uma solução para a exibição das informações de consumo individualizadas nas unidades consumidoras, exigência legal que os SMCs devem atender, resgatando o modelo utilizado no Sistema de Telecomando Centralizado desenvolvido pelo CEPEL.

1. Introdução

O uso da rede de distribuição de energia elétrica como meio de propagação de sinais de comunicação é conhecido há mais de 50 anos. Este meio de comunicação é utilizado principalmente para transportar informações de interesse da própria empresa concessionária de energia elétrica, tais como sinais de controle de postos tarifários, limitação de demanda, estado de dispositivos, e ainda a leitura remota de medidores. Quando o volume de informações trocadas é pequeno e as funções não são críticas permitindo tempos relativamente longos para a realização destas funções, é possível o uso de sinais com baixas taxas de transmissão utilizando portadoras com frequências relativamente baixas ou moderadas.

As características de capilaridade do sistema elétrico despertaram ainda o interesse das concessionárias em estender o uso das suas redes de distribuição para aplicações com altas taxas de transferência de dados, tais como Internet banda larga, VoIP, segurança, para potencializar o uso da infra-estrutura existente e exercer atividades multisetoriais, mas estas aplicações não serão discutidas neste trabalho.

As redes de distribuição de energia elétrica, porém se comportam de maneira hostil para propagação de frequências muito superiores a 50Hz ou 60Hz (frequências para as quais elas foram projetadas). Além disso, as características das cargas sofreram significativas modificações ao longo desses 50 anos, o que significa que algumas soluções que exibiam bom desempenho no passado podem simplesmente não funcionar atualmente.

Deve ser destacado que, qualquer iniciativa de adoção de soluções baseadas no uso da rede de distribuição de energia elétrica para transferência de dados, deve ser precedida por uma investigação de desempenho que contemple ensaios nas redes e nas condições de carga a que estarão sujeitos os equipamentos, pois o ambiente ao qual está submetida a solução PLC tem influência significativa sobre o seu desempenho. Sua adoção deve ser analisada de maneira rigorosa, baseada em critérios técnicos e econômicos.

Neste artigo pretende-se discutir os desafios técnicos relacionados ao uso de redes de distribuição de energia elétrica para propagação de sinais, descrever as experiências desenvolvidas pelo CEPEL que ilustram os desafios mencionados no uso destas soluções, e apresentar as aplicações que se utilizam destas tecnologias.

2. As redes de distribuição de energia elétrica como meio de propagação de sinais

2.1. Aspectos gerais

O uso da rede de distribuição de energia elétrica como meio comunicação de dados (PLC), ver 1 e 2, pode ser classificada em três segmentos principais segundo sua capacidade de transferência de dados:

PLC unidirecional – caracterizado pela utilização de portadoras de frequências muito baixas, da ordem de centenas de Hz, que garante a propagação da informação ao longo de toda a rede de distribuição. É a implementação de mais baixo custo por ponto atendido, nas aplicações que só demandam fluxo de informações no sentido concessionária > consumidor, tais como envio de sinais tarifários.

PLC bidirecional (“narrow band”) – caracterizado pela utilização de portadoras de frequências da ordem de dezenas a centenas de kHz. Nesta faixa de frequências os sinais já estão sujeitos a atenuações elevadas, são susceptíveis às interferências e às variações das cargas, além de estarem sujeitos às reflexões causadas pelos pontos de conexão e variações geométricas das redes. A transferência bidirecional dos dados possibilita a sua utilização em aplicações que envolvam fluxo de informações nos dois sentidos entre a concessionária e o consumidor. Esta funcionalidade é possível com um custo incremental com relação ao PLC unidirecional, em função do acréscimo de complexidade necessário para contornar os problemas mencionados. São utilizadas técnicas como espalhamento espectral de sinais (“spread-spectrum”) e processamento digital de sinais (DSP). Suas aplicações principais são: leitura remota de medidores, levantamento de curvas de carga, corte e religação remota de unidades consumidoras. No caso do PLC “narrow-band” seu emprego é parte de uma visão estratégica da empresa para fugir da dependência de outros provedores de serviços de comunicação de dados, que seriam necessários para atender os requisitos de operação das redes e de serviços da distribuidora

PLC “broad band” (denominado Broadband over Power Line - BPL) – caracterizado pela utilização de frequências portadoras entre 3 a 30 MHz, os sinais estão sujeitos aos mesmos problemas do “narrow-band”, experimentam atenuações mais elevadas e estão submetidos às interferências eletromagnéticas uma vez que utiliza a faixa de frequência alocada para radiodifusão (ondas curtas). O emprego de BPL é encarado como “oportunidade de negócio”, voltado para a oferta de serviços de comunicação a terceiros, O uso combinado de BPL com PLC “narrow-band” tem sido idealizado para aplicações “Smart-grid”.

Seja qual for a estratégia que leve a concessionária de energia elétrica a utilizar suas redes de distribuição como meio de comunicação, é imprescindível uma análise técnico-econômica das soluções comerciais disponíveis, que deve abranger não só as soluções de PLC, como também as outras tecnologias de comunicação existentes, sobretudo se a opção pelo uso da rede for para oferta de serviços. Deve ser observado ainda a não existência de uma padronização dos equipamentos, as soluções comerciais que estão em desenvolvimento não são intrinsecamente compatíveis do ponto de vista de interoperabilidade, princípio que é fundamental para a difusão da aplicação no futuro.

2.2. Experiência do CEPEL em tecnologias PLC

O objetivo do CEPEL ao realizar experiências em tecnologias PLC é pesquisar soluções de telecomunicações que sejam aplicáveis às funções de automação da distribuição de energia elétrica, incluindo àquelas relacionadas ao faturamento de energia e recuperação de receitas.

O CEPEL já realizou diversas pesquisas envolvendo diferentes aplicações que utilizam as de redes de distribuição de baixa tensão como meio de comunicação, veja 3. Estas investigações abrangeram os diferentes segmentos de PLC, visaram propósitos diferentes, e foram realizadas em períodos distintos. Atualmente o CEPEL estuda a aplicação de PLC para atender duas funções necessárias ao Sistema de Medição Centralizada (SMC), detalhes em 4,5 e 6:

- tráfego de informações entre Unidades de Medição (UM) e a Unidade de Medição e Comunicação (UMC) – comunicação bidirecional;
- tráfego de informação entre a UMC e os Terminais de Consulta ao Consumo Individuais (TCCI) – comunicação unidirecional.

Para atender a comunicação entre as UMs e a UMC o CEPEL optou pela utilização de uma solução comercial e para isso ensaiou duas opções de modems PLC disponíveis. A primeira apresentou comportamento instável e inadequado ainda em testes de laboratório. A segunda opção mostrou estabilidade de comportamento e desempenho satisfatório em laboratório, o que a credenciou para ensaios de campo que serão descritos no item 4.

Para implementar a transferência de dados de consumo da UMC para os TCCIs o CEPEL optou por resgatar uma solução de baixo custo e alta confiabilidade adotada anteriormente no Sistema de Telecomando Centralizado, consultar 7 e 8, a saber PLC unidirecional tipo “ripple-control”.

3. Solução comercial bidirecional para tráfego entre a UMC e as UMs

3.1. Descrição dos ensaios de campo realizados

Os ensaios de campo foram conduzidos em uma rede de distribuição aérea convencional de baixa tensão do PT-1465 do alimentador AF-07 da CERON, na cidade de Porto Velho, Rondônia, durante a semana de 10 a 14 de dezembro de 2007. Esta rede foi selecionada porque nela está sendo implantado um sistema piloto de medição centralizada, veja também 9, e o desempenho dos modems PLCs poderia ser avaliado nas condições reais de operação. Um esquemático da rede na qual foram realizados os ensaios está apresentado na figura 1. Pode-se observar que a rede atende a uma quadra com 24 postes, sendo que destes, 19 possuem ramais de derivação atendendo a unidades consumidoras onde serão instaladas UMs.

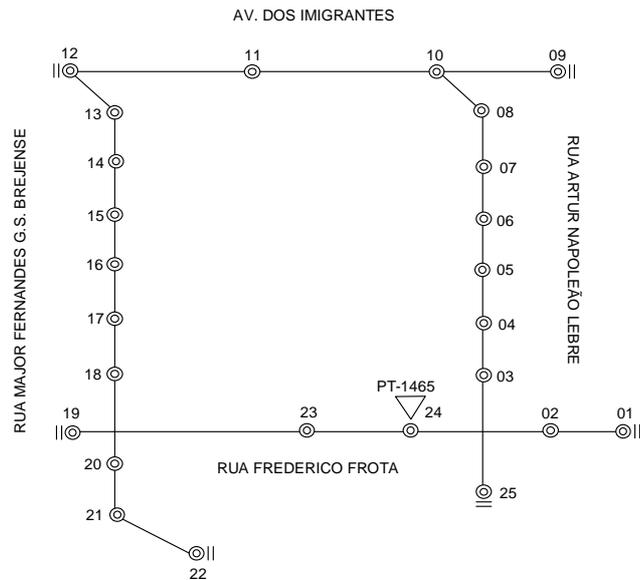


Figura 1 - Diagrama unifilar da rede de distribuição que abrigou os ensaios

As UMs, além dos módulos de medição, possuem também um módulo de alimentação e controle (MAC) onde residem os dispositivos de comunicação. Os ensaios foram realizados com auxílio de 3 MACs (MAC1, MAC2 e MAC3), montados em laboratório e acondicionados em caixas individuais protegidas contra intempéries, programados com um “firmware” especialmente desenvolvido para este fim. O circuito elétrico do MAC e a montagem mecânica são idênticos àqueles utilizados na versão final do SMC. Os ensaios foram realizados em duas etapas. A primeira etapa foi realizada ao longo dos dias 11 e 12 de dezembro de 2007. A segunda etapa entre os dias 13 e 14 de dezembro de 2007. Nesta rede, a Rua Artur Napoleão Lebre é a de maior responsabilidade para o carregamento da rede, com cerca de 33 (28 unidades consumidoras atendidas pelos postes de números de 3 a 7) das 64 unidades consumidoras pertencentes a este circuito.

3.2. Primeira etapa

Na primeira etapa foram utilizados dois MACs (uma unidade transmissora T e uma unidade receptora R) posicionados em postes distintos. Esta etapa iniciou-se com a instalação do MAC T (MAC1 configurado como transmissor) no poste que possui o transformador de distribuição instalado, poste número 24, e o MAC R (MAC2 configurado como receptor) nos postes adjacentes. O MAC T foi programado para enviar um pacote de dados com 10 bytes pré-definidos. O MAC R foi programado para analisar os pacotes recebidos e verificar se a seqüência está correta. Em caso negativo, o MAC R ignora o pacote recebido causando um erro de comunicação que é computado pelo MAC T. Em caso afirmativo, o MAC R responde um ACK para o MAC T informando que o pacote foi recebido com sucesso, em seguida o MAC R monta um pacote com 19 bytes e os envia para o MAC T.

O MAC T, ao receber inicialmente o ACK do MAC R, inicia um contador de tempo de espera e aguarda o pacote de resposta de 19 bytes. Caso o MAC R não responda dentro do tempo previsto, um erro de comunicação é computado pelo MAC T. Caso o MAC T receba com sucesso o pacote de 19 bytes, sem erros, a comunicação é computada com sucesso. Esta seqüência de comunicação foi realizada pelo menos 100 vezes para cada trecho.

Se a comunicação fosse bem sucedida com taxa superior a 50%, o MAC receptor R era afastado para o poste seguinte e o ensaio de comunicação era repetido. O procedimento prosseguia desta forma até que a comunicação atingisse taxas inferiores a 50%.

A tabela 1 apresenta um resumo das situações de ensaios realizados utilizando-se apenas dois MACs.

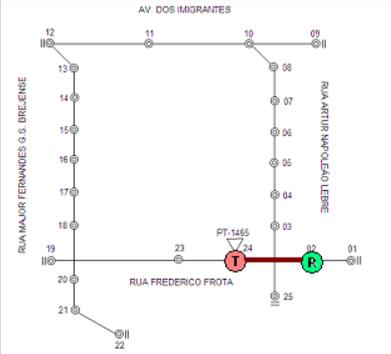
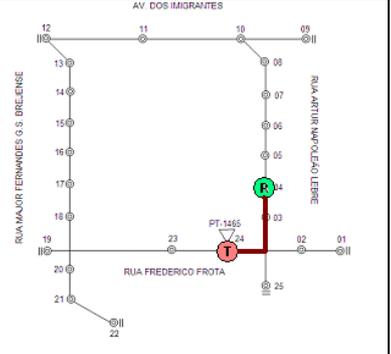
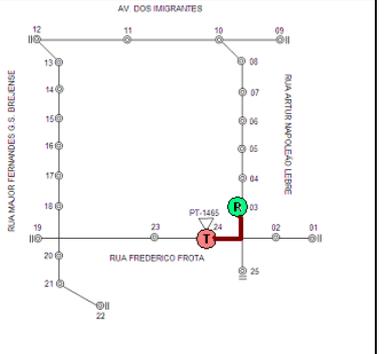
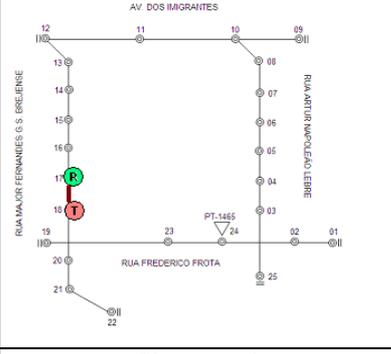
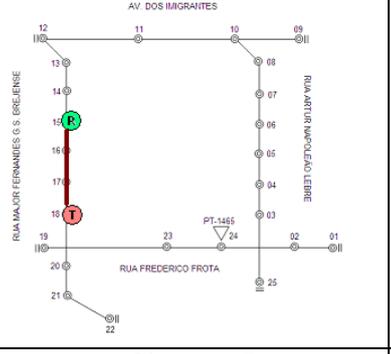
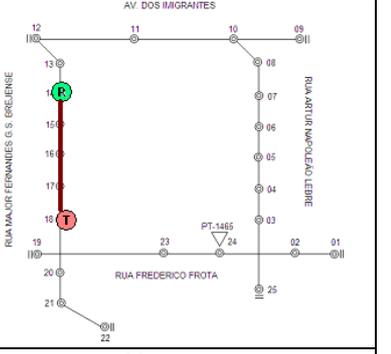
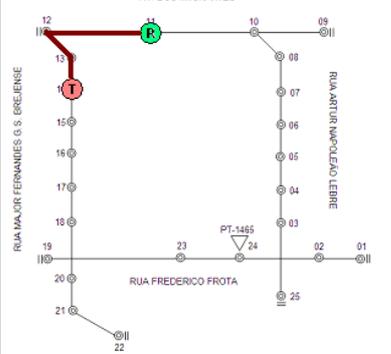
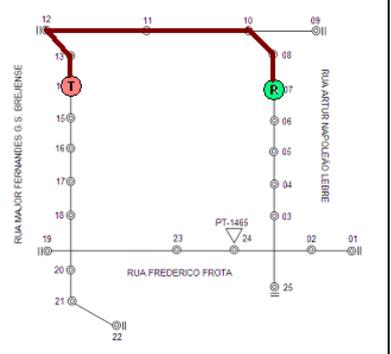
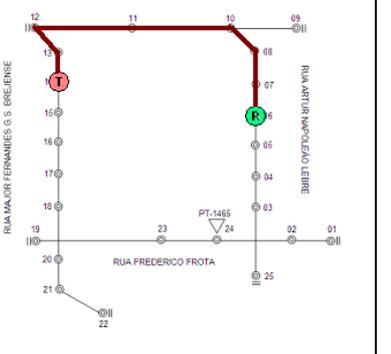
		
Situação 1	Situação 2	Situação 3
Comunicação bem sucedida	Comunicação sem sucesso	Comunicação bem sucedida
Taxa de acerto – 100%	Taxa de erro – 100%	Taxa de acerto – 97,3%
		
Situação 4	Situação 5	Situação 6
Comunicação bem sucedida	Comunicação bem sucedida	Comunicação não confiável
Taxa de acerto – 100%	Taxa de erro – 100%	Taxa de erro – 83%
		
Situação 7	Situação 8	Situação 9
Comunicação bem sucedida	Comunicação bem sucedida	Comunicação sem sucesso
Taxa de acerto – 100%	Taxa de acerto – 100%	Taxa de erro – 100%

Tabela 1 – Resumo das situações de ensaios realizados durante a primeira etapa

3.3. Segunda etapa

Na segunda etapa foram instalados os 3 MACs em postes contíguos, no trecho de maior carregamento da rede. O MAC1 foi programado para armazenar os resultados dos ciclos de comunicação. Um medidor modelo Saga 4000 com capacidade de armazenamento de grandezas elétricas (tensão, corrente, potência, energia, fator de potência) foi instalado junto ao transformador MT/BT da rede. Esta configuração possibilitou comparar o desempenho da comunicação com o nível de carregamento do trecho da rede de distribuição onde os MACs estavam instalados.

O MAC1 foi programado para emular o funcionamento da UMC no sistema de medição centralizada. Seu programa espera um período de tempo de 5 minutos para iniciar uma comunicação. Cada

comunicação foi efetuada enviando-se um pacote de dados de 10 bytes do MAC1 para o MAC3, que deveria responder com um pacote de 19 bytes. Foram realizados dois tipos de comunicação:

- a) MAC1 tenta falar com MAC3 através do MAC2 (Comunicação MAC1-MAC2-MAC3)
 - MAC1 envia mensagem para MAC2 que reenvia para MAC3.
 - MAC3 envia resposta para MAC2 que reenvia para MAC1.
 - Se MAC1 recebe resposta então comunicação foi bem sucedida.
- b) MAC1 tenta falar com MAC3 diretamente (Comunicação MAC1-MAC3)
 - MAC1 envia mensagem para MAC3.
 - MAC3 envia resposta para MAC1.
 - Se MAC1 recebe resposta então comunicação foi bem sucedida

O ensaio foi conduzido no período das 10hs de 13/12/2007 às 10h35min de 14/12/2007.

A tabela 2 contém os resultados consolidados da avaliação de desempenho da rede para ambas as condições descritas acima, e a tabela 3 apresenta as curvas que foram obtidas através do equipamento de monitoramento, e das informações consolidadas que foram armazenadas nos MACs. O modem de comunicação PLC possui uma indicação da qualidade do canal de comunicação (variação de 1 a 7), que também foram registradas nos ensaios.

	Resultados dos ensaios de comunicação MAC1 → MAC2 → MAC3		
	Total de transmissões	149	Taxas
	Acertos	138	92.62 %
	Erros	11	7.38 %
	Erros ACK	9	6.04 %
	Erros Timeout	2	1.34 %
	Qualidade do canal	3/7	
	Resultados dos ensaios de comunicação MAC1 → MAC3		
	Total de transmissões	147	Taxas
	Acertos	71	48.30 %
Erros	76	51.70 %	
Erros ACK	62	42.18 %	
Erros Timeout	14	9.52 %	
Qualidade do canal	2/3/6/7		

Tabela 2 – Desempenho da rede como canal de comunicação no trecho de maior carregamento ao longo de 24 horas.

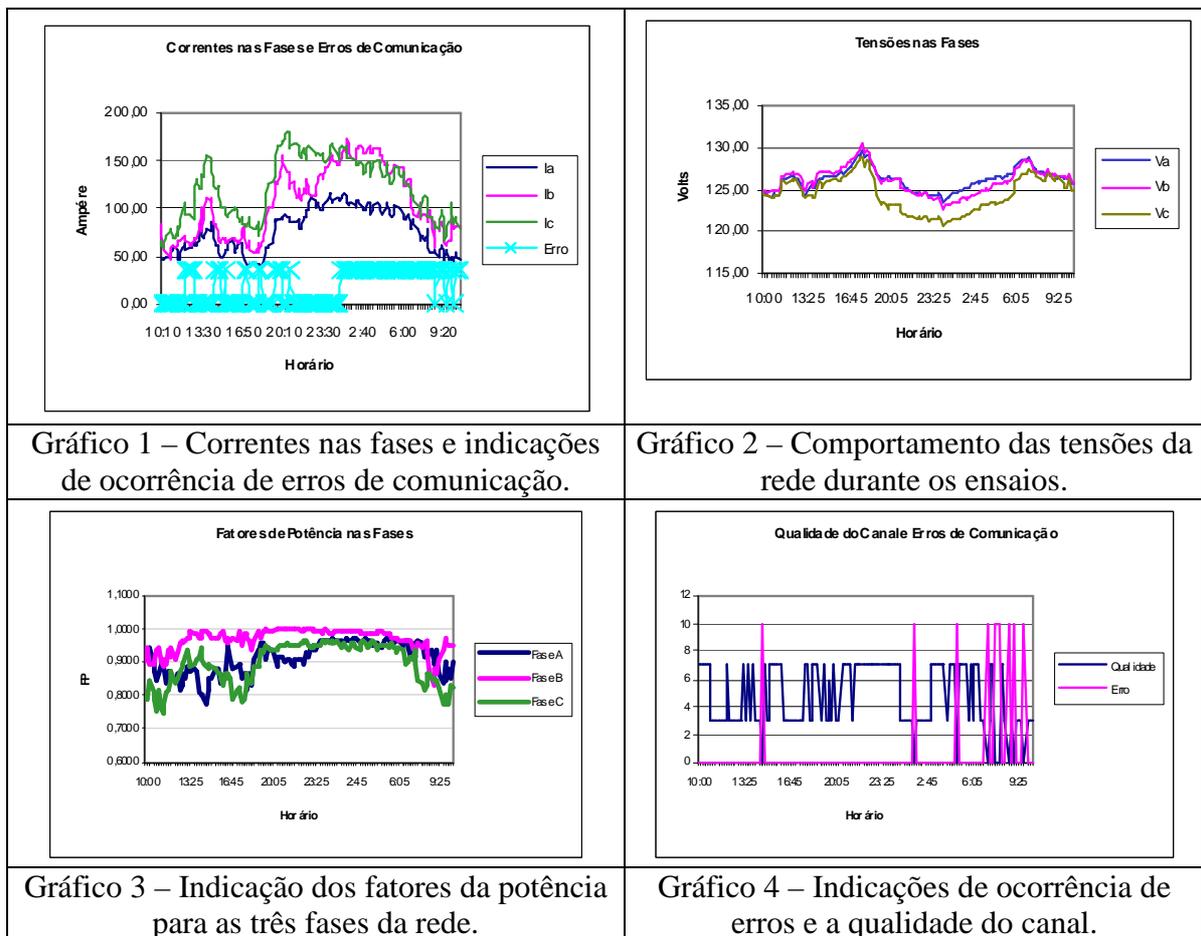


Tabela 3 – Levantamento da curvas de carga da rede e da qualidade da rede como meio de propagação de sinais de comunicação.

3.4. Análise dos Resultados

Os resultados observados mostram, como esperado, que a qualidade das comunicações é variável em função da carga da rede e do posicionamento dos equipamentos ao longo da rede.

Os trechos da rede que apresentam maior carregamento são aqueles de maior dificuldade para a transferência de dados, evidenciado pelos resultados apresentados na situação 2. Naquele trecho, em determinados momentos não foi possível transpor mais que um vão entre postes. Esta afirmativa é corroborada pelos resultados obtidos nos ensaios da segunda etapa, que estudou a variabilidade do canal ao longo do dia. As tentativas de comunicação direta entre MAC1 e MAC3 apresentaram taxas equivalentes de sucesso e de erro (ver tabela 2), indicando que em determinados períodos do dia e para determinadas condições, a qualidade do canal estava favorável.

Em trechos de menos carregamento foi possível transpor mais que dois vãos entre postes, sendo que na Rua Major Fernandes Brejense encontra-se o trecho com o segundo maior carregamento (15 unidades consumidoras), e as taxas de comunicação foram inadequadas na tentativa de se transpor 3 trechos (situação 6). Afastando-se ainda mais das condições de maior carregamento, observa-se que as comunicações tornam-se favoráveis, sendo possível transpor 2 esquinas (situação 8). Na situação 9, um dos modems se situa em ponto de carga elevada e a comunicação torna-se inviável.

Pela variabilidade de condições encontradas, e baseando-se no resultado de que as comunicações são sempre bem sucedidas em trechos cujo as UMs sejam contíguas, adotou-se a solução de um protocolo de repasse de pacotes. A comunicação é iniciada pela UMC, as informações são repassadas entre UMs vizinhas até que a informação alcance a UM destino. A comunicação no sentido inverso é realizada da mesma forma.

4. Solução unidirecional para informação de consumo individualizado em SMC

O Sistema Eletrônico para Monitoração Individualizada de Consumos (SEMIC) é a proposta de solução do CEPEL para atender a necessidade legal de prover ao consumidor atendido por sistemas de medição centralizada, o acesso individualizado às suas informações de consumo, com baixo custo e alta confiabilidade.

O SEMIC se constitui de uma Unidade de Comunicação e Injeção (UCI), instalada junto ao transformador de distribuição e vários Terminais de Consulta ao Consumo Individual (TCCI), um para cada unidade consumidora.

O diagrama de blocos do sistema pode ser visto na figura a seguir.

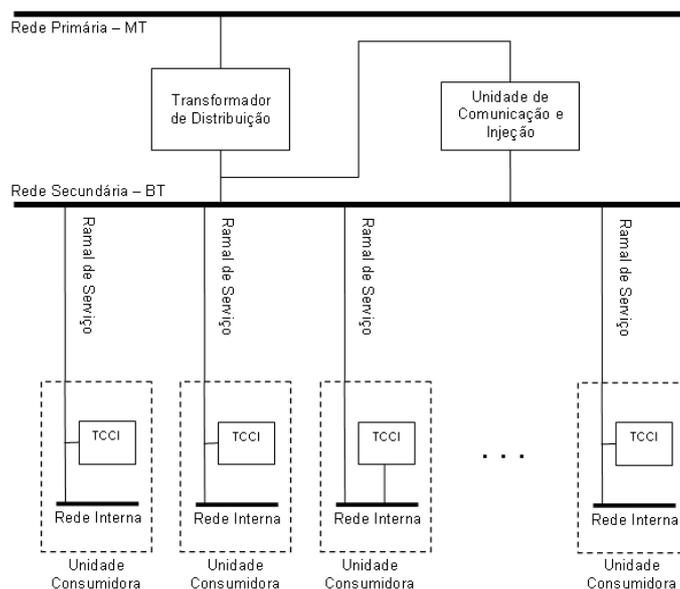


Figura 2 - Diagrama de blocos do SEMIC

A UCI é a responsável pelo interfaceamento entre o SMC e o SEMIC e também pela injeção de sinais na rede de distribuição secundária. São várias as opções de interfaceamento possíveis entre os dois sistemas, sendo as mais comuns a conexão direta através de porta de comunicação ótica ou elétrica, ou conexões remotas através de dispositivos de comunicação sem fio como rádios na faixa de RF, dispositivos Bluetooth, dispositivos Zigbee e modems celulares GSM/GPRS. Uma vez que a UCI esteja de posse dos dados de consumo, ela fará a transferência desses dados para os TCCIs pertencentes a rede, através da injeção de sinais na rede de distribuição secundária.

Para garantir alta confiabilidade associada a baixo custo o CEPEL optou por utilizar a sua solução de injeção unidirecional e de baixa frequência, que já havia sido utilizada com grande confiabilidade no Sistema de Telecomando Centralizado (STC).

Uma vez que os TCCIs são equipamentos que não precisam enviar informações para o SMC, mas apenas receber deste as informações de consumo, a unidirecionalidade da injeção de sinais do STC é perfeitamente adequada.

O STC em sua implementação básica é constituído de um transmissor de onda portadora (TOP), que através da injeção em série no condutor neutro, envia as informações para os receptores de onda portadora (ROP) que se encontram nas unidades consumidoras. Devido às baixas frequências utilizadas para a transmissão de dados, o sinal se propaga com baixas atenuações e sem susceptibilidade a ruídos ao longo de toda a rede.

Isto permite que o TCCI possa ser instalado tanto na caixa que abrigava o medidor para faturamento (que foi retirado devido a colocação do SMC no poste da rede de distribuição), ou seja, no ramal de

serviço, quanto em qualquer ponto de alimentação da rede interna da unidade consumidora (tomada). Essas duas opções encontram-se representadas no diagrama de blocos do SEMIC da figura 2.

O sistema proposto permite ainda que a solução seja adotada para qualquer Sistema de Medição Centralizada (qualquer fabricante), bastando para isso que as informações de consumo sejam disponibilizadas, por uma das opções de interfaceamento já mencionadas, para a UCI.

5. Conclusões

Foram apresentados os resultados dos ensaios de campo visando avaliar a comunicação via PLC entre unidades de medição constituintes dos Sistemas de Medição Centralizada que são instaladas em postes da rede de distribuição. Com base nos resultados alcançados podemos concluir que a comunicação entre MACs via PLC apresentou taxas de acertos suficientes para permitir a comunicação entre as unidades de medição. Os resultados indicam que a comunicação via PLC é uma opção viável para implementação da comunicação entre as unidades de medição do Sistema de Medição Centralizada, desde que adotado o protocolo de repasse de informações.

Foi apresentada também a proposta do CEPEL para implementação de uma solução de baixo custo e alta confiabilidade visando atender a determinação legal da existência de um terminal de consulta ao consumo em cada unidade consumidora atendida por um sistema de medição centralizada. baseado no desenvolvimento anterior do CEPEL, o Sistema de Telecomando Centralizado, cujas principais características são a injeção de sinais em série, no condutor neutro, em baixa frequência, que permite implementar comunicação via PLC unidirecional, adequada para transferências dos dados de consumo aos terminais de consulta de maneira e robusta e com baixo custo.

As possibilidades quanto ao uso da tecnologia PLC corresponderam às expectativas iniciais, o seu uso é viável desde que sejam respeitadas as limitações para cada aplicação, principalmente a confiabilidade de propagação e as taxas de transferências de dados.

6. Referências

- 1 Souza, F. C. & Bandim, C. J. El uso de redes de distribución como medio de datos. Revista Cables y barriles. vol 3, disponível em: <http://www.bittium-energy.com>. Ecuador, p.47 - 57, 2007.
- 2 Vargas, A.A. & Pereira, C.E. & Lages, W.F. & Carro, L. Comunicação de dados através da rede Elétrica. Departamento de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre 2004, <http://www.ece.ufrgs.br/~fetter/plt/rel1q1.pdf>.
- 3 Alvarenga, L. M. & Pinto JR, A. V. & Souza, F. C., & Bandim, C. J. Considerações sobre o uso de redes de distribuição de energia elétrica como meio de propagação de sinais de comunicação. In Anais do XVI SNPTTE XVI SNPTTE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica Campinas - SP 2001.
- 4 Costa, R. S. & Caldas, R. P. & L. M. Alvarenga, . Pinto Jr., A. V & Souza, F. C. & Pimentel, J. C. G. & Bandim, C. J. Sistema e Processo para Medição do Consumo de Energia Elétrica Referente a uma Pluralidade de Consumidores – Carta Patente nº PI 9202095-0, Privilégio de Invenção.
- 5 Bandim, C. J. & Luiz, F. C. & Pinto Jr., A. V. & Souza, F. C. & Suhett, M. R. & Alvarenga, L. M. & Caixao, S. Centralized Metering: Technology to aid energy distribution utilities In: 3er Congreso Internacional de la Región Andina ANDESCON 2006, 2006, Quito - Equador.
- 6 Bandim, C.J. & Souza, F.C. & Alvarenga, L.M. & Pinto Jr., A.V. & Luiz, F.C. & Alves Jr., J.E.R. & Loureiro, M.R.B. & Dantas, A.R. & Durand, F.G. Centralized Metering System In Buildings In: CIDEL Argentina 2002, Buenos Aires, Argentina, 2002.
- 7 Souza, F. C. & Pinto Jr., A. V. & Alvarenga, L. M. & Bandim, C. J. & Lin, J. M. & Lourenço, C.R.S.H. & Kopiler, A.A. A Centralized Telecontrol System for Load Control and Multiple Tariff Structures. In: CIDEL Argentina 2002, Buenos Aires, Argentina, 2002,.

8 Pinto Jr., A.V. & Souza, F.C. & Santos, B.V, Avaliação técnico-econômica da experiência piloto de gerenciamento de demanda na área de concessão da Light. IV Encontro Luso-Afro-Brasileiro de Planejamento e Exploração de Redes de Energia, junho 99, Rio de Janeiro, RJ.

9 Gama, S.Z. & Coelho, L.C. & Cruz, A.M.T. & Cursino, E.A. & Lucena, P.C.V. & Souza, N.A.C. & Rodrigues, E.C. & Pinto Jr., A.V. & Alvarenga, L.M. & Bandim, C.J. & Souza, F.C. & Luiz, F.C. & Caixão, S.A. & Castellões, O.G.S. & Alves Jr, J.E.R. & Loureiro, M.R.B. & Dantas, A.R. & Magalhães, C.A. & Söndahl, D.C. & Min L.J. Uma Nova Abordagem Tecnológica de Combate Às Perdas Comerciais - XV Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica - SENDI 2002.