

Aplicação de Rádios para Melhorar a Operação da Proteção Elétrica

Shankar V. Achanta, Brian MacLeod, Eric Sagen e Henry Loehner
Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.

Publicado no
SEL Journal of Reliable Power, Volume 1, Número 2, outubro de 2010

Originalmente apresentado na
37th Annual Western Protective Relay Conference, outubro de 2010

Traduzido para o português em julho de 2016

Aplicação de Rádios para Melhorar a Operação da Proteção Elétrica

Shankar V. Achanta, Brian MacLeod, Eric Sagen e Henry Loehner, *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

Sumário—Há algumas décadas, a comunicação dos sistemas de potência era efetuada através de Sistemas Carrier de Linhas de Transmissão (“Power Line Carrier” – PLC), linhas de telefone contratadas (“leased telephone lines”) ou fio piloto—todos com equipamentos caros nos terminais. Posteriormente, as empresas concessionárias de energia elétrica implementaram sistemas de comunicação sofisticados através de microondas, além de utilizar a fibra óptica no cabo de guarda óptico com fio terra (“Optical Ground Wire” – OPGW) ao longo de diversas linhas de transmissão. Mais recentemente, o rádio foi introduzido nas aplicações de teleproteção. Este artigo discute os conceitos fundamentais dos sistemas de rádio, considerando-os em termos dos requisitos de controle e proteção para os modernos sistemas de potência. Em diversas situações, as soluções baseadas no rádio consistem numa forma econômica e confiável para melhorar a velocidade e sensibilidade dos sistemas de transmissão e distribuição. Além disso, o uso do rádio propicia integrar de forma econômica a geração distribuída praticamente em qualquer ponto dos sistemas de controle de potência.

Este artigo começa apresentando os princípios fundamentais e conclui indicando os benefícios econômicos das soluções de controle baseadas no rádio. Ele considera os parâmetros do sistema para proteção através de soluções com rádio e discute onde, quando e de que forma aplicar o rádio como método de comunicação da proteção. O artigo descreve os princípios do rádio licenciado e não-licenciado, técnicas de espalhamento espectral (“spread-spectrum”) e requisitos de dados para proteção de alta velocidade. Finalmente, analisa os benefícios econômicos da expansão da proteção de alta velocidade nos sistemas de distribuição e subtransmissão.

I. INTRODUÇÃO: ONDE, QUANDO E COMO USAR OS RÁDIOS

Na proteção elétrica, os rádios são usados na automação da distribuição, geração distribuída e proteção de retaguarda para outros esquemas primários. Eles também são usados para fornecer proteção mais rápida para os esquemas existentes. Os benefícios do rádio incluem menor custo, maior facilidade de implementação e simplicidade no planejamento quando comparado a outros métodos de comunicação. Os rádios são adequados à maioria das aplicações de proteção elétrica em todas as partes do sistema de potência; contudo, não são apropriados a todas as situações. Um dos autores efetuou uma análise das linhas de transmissão de uma importante concessionária de energia elétrica dos Estados Unidos, conforme mostrado na Fig. 1. Os resultados mostram que a grande maioria das linhas tem 21 milhas ou menos de comprimento, uma distância facilmente coberta pela maior parte dos rádios projetados para controle industrial.

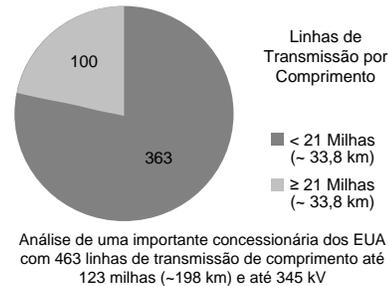


Fig. 1. Distâncias Requeridas para Proteção

Nas aplicações de geração distribuída, as concessionárias de energia elétrica não são proprietárias da instalação de geração e frequentemente não possuem sistemas de comunicação instalados no local. O objetivo do sistema de proteção é separar a geração do sistema elétrico durante condições de falta no sistema. Um esquema simples de transferência de trip pode ser projetado usando-se o rádio a um custo muito menor do que a instalação de fibra óptica ou linhas de comunicação contratadas (“leasing”). O uso do rádio preserva o capital da concessionária e evita elevados investimentos em instalações que não pertencem à concessionária. O link via rádio é estabelecido entre o local da geração e um ponto de conexão comum do sistema de transmissão, conforme mostrado na Fig. 2.

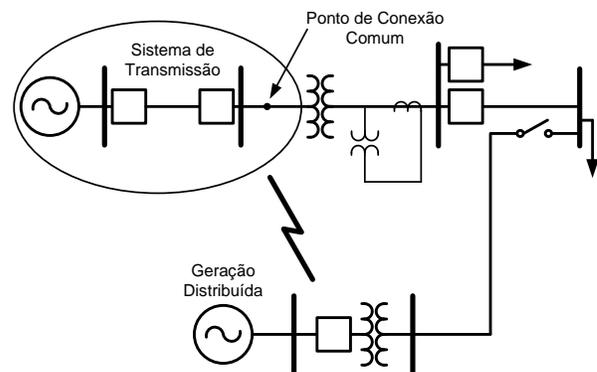


Fig. 2. Proteção da Geração Distribuída

Os rádios melhoram a velocidade e a sensibilidade dos sistemas de transmissão. Considere um esquema de proteção de distância existente com zonas temporizadas, conforme mostrado na Fig. 3.

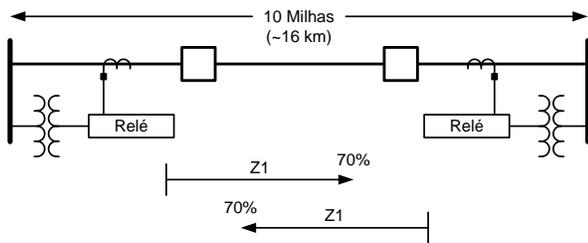


Fig. 3. Proteção Sem Comunicação

A proteção da Zona 1 é rápida, porém uma falta que ocorre na Zona 2 leva mais tempo para ser detectada e eliminada. A sensibilidade menor e a resposta da proteção mais lenta aumentam o esforço imposto aos componentes do sistema de transmissão, levando a falhas prematuras e reduzindo a confiabilidade.

A adição da comunicação via rádio tem como resultado uma proteção de alta velocidade em todo o comprimento da linha, conforme detalhado na Fig. 4. A atuação da proteção pode ocorrer em 2 a 4 ciclos elétricos comparados com 20 a 40 ciclos elétricos para a proteção da Zona 2 da Fig. 3. Esta é uma melhoria dez vezes maior.

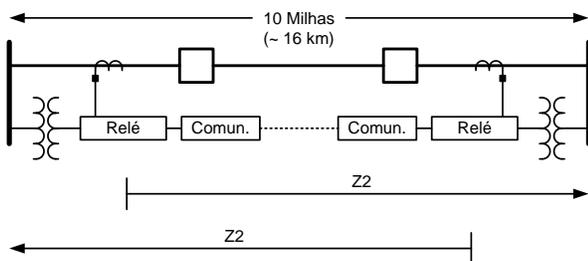


Fig. 4. Proteção Com Comunicação

Como exemplo final, os rádios têm inúmeras aplicações na automação da distribuição. Diversos formas de controle do religador e aplicações de esquemas em anel são compatíveis com o menor custo de implementação dos rádios. A sensibilidade aos custos dos sistemas de distribuição faz com que a compatibilidade da comunicação via rádio seja especialmente adequada.

II. PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DO RÁDIO

A. Uso do Rádio para Transmissão de Informações

O uso dos sinais de radiofrequência (“radio frequency” – RF) para transmissão sem fio (“wireless”) de informações teve início no começo do século 20 com a troca de sinais através do código Morse via transmissor “spark-gap”; a partir de então, a tecnologia avançou e evoluiu para se tornar parte integral de ambas as transmissões de dados e voz do mundo atual. As seções seguintes exploram rádios que utilizam bandas não-licenciadas para transmissão de dados.

B. Modulação

Um sinal de rádio com forma de onda senoidal, baseado numa única frequência, denominado carrier, não transmite, sozinho, informações. Para que as informações possam ser transmitidas, a onda do rádio tem que ser modulada de alguma

forma. Modulação é o processo de variação sistemática de algumas características do sinal carrier RF de forma a transmitir as informações. O carrier RF é representado em (1).

$$A_c \cos(2\pi f_c t + \phi) \quad (1)$$

onde:

A_c é a amplitude.

f_c é a frequência.

ϕ é a fase.

As informações podem ser transmitidas variando-se qualquer uma dessas características do carrier (A_c , f_c ou ϕ) ou alguma combinação das três.

A modulação da amplitude é um exemplo de modulação analógica onde a amplitude (A_c) do carrier é modulada pelo sinal de informação diretamente, conforme mostrado na Fig. 5.

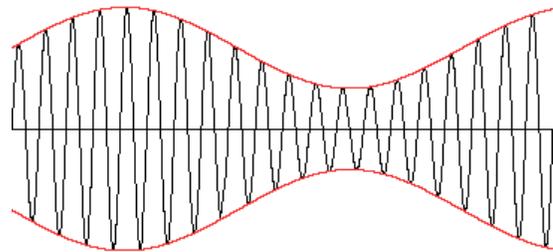


Fig. 5. Exemplo de Modulação da Amplitude

As informações existentes neste sinal são representadas pela variação na amplitude do carrier senoidal.

O chaveamento de frequência (“Frequency shift keying” – FSK) é um exemplo de modulação digital onde a frequência do carrier é chaveada entre duas frequências discretas para representar os uns ou zeros de uma representação digital das informações que estão sendo transmitidas. Um sinal FSK está mostrado na Fig. 6.

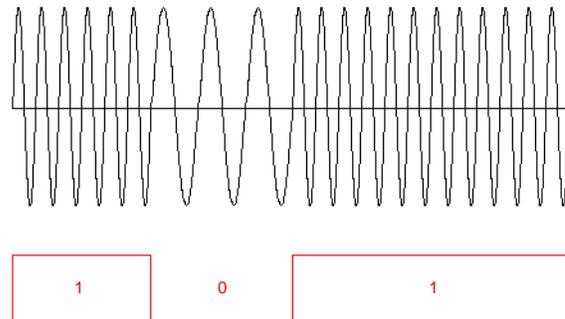


Fig. 6. Exemplo de Sinal Modulado via FSK

Tradicionalmente, frequências entre alguns kHz e alguns GHz têm sido usadas para transmissão via rádio. As frequências do carrier usadas para transmissão via rádio são muito maiores do que a taxa de informações do sinal modulado. Frequências maiores são usadas para transmissão via rádio em função da maior eficiência de propagação e imunidade a ruídos, bem com da redução no tamanho das antenas requeridas. A frequência (f) e o comprimento de onda (λ) de um sinal de rádio estão relacionados à velocidade da luz (C) através de um meio específico, conforme mostrado em (2).

$$C = f \cdot \lambda \quad (2)$$

A partir de (2), pode-se observar que à medida que a frequência aumenta, o comprimento de onda diminui, e vice-versa. O tamanho da antena está relacionado ao comprimento de onda do sinal; na prática, é normalmente de um quarto do comprimento de onda.

Quando um carrier RF é modulado, a forma de onda senoidal baseada numa única frequência é transformada em um sinal complexo com múltiplos componentes da frequência agrupados ao redor do carrier (dependendo da técnica de modulação, um carrier discreto pode até não estar presente). A largura de banda (“bandwidth” – BW) do sinal do rádio é definida como a faixa das frequências ocupada pelo sinal RF modulado. O projeto do sistema do rádio tenta maximizar a taxa de dados para uma determinada BW por meio de técnicas de modulação eficientes. A BW ocupada por um sinal RF varia em função do tipo de modulação usada; porém, em geral a BW ocupada é maior do que ou igual à taxa de informações que estão sendo transmitidas. Para um sistema FSK, a BW ocupada de um canal de rádio é aproximadamente duas vezes a taxa de dados transmitidos.

Para que um link de rádio seja estabelecido, as informações a serem transmitidas têm que ser impostas ao carrier RF no transmissor através da modulação do sinal RF e extraídas do sinal RF no receptor através de demodulação. Isso requer que os processos de modulação e demodulação sejam compatibilizados entre o transmissor e o receptor.

C. Perda no Caminho do Sistema de Rádio

A maioria dos sistemas de comunicação via rádio depende de um caminho com linha de visada direta entre os dispositivos de transmissão e recepção para estabelecer um link de comunicação confiável. Uma propriedade fundamental de um sistema de rádio com linha de visada é a atenuação do sinal transmitido à medida que a distância entre o transmissor e o receptor aumenta. Esta atenuação do sinal com a distância é referida como perda de propagação ou perda no caminho. Os engenheiros de rádio usam a seguinte equação simplificada para a perda no caminho entre duas antenas de rádio num espaço livre:

$$L_p(\text{db}) = 20 \log(4\pi d / \lambda) \quad (3)$$

onde:

L_p é a perda no caminho em dB.

d é a distância entre o transmissor e o receptor.

λ é o comprimento de onda do carrier RF usando as mesmas unidades da distância [1].

Esta equação da perda no caminho pode ser rearranjada e simplificada de forma a fornecer a perda no caminho em termos da distância em milhas entre o transmissor e o receptor e a frequência do carrier RF em MHz, conforme mostrado em (4) [2].

$$L_p(\text{db}) = \left[36.57 + 20 \log(d_{\text{milhas}}) + 20 \log(\text{Freq}_{\text{MHz}}) \right] \quad (4)$$

A análise de (4) mostra que a perda no caminho é diretamente proporcional tanto à distância entre os rádios

quanto à frequência de transmissão. Esta equação é frequentemente usada em conjunto com a máxima potência de transmissão e sensibilidade do receptor para especificar a faixa máxima da linha de visada de um rádio ou para estimar a sensibilidade do receptor e potência de transmissão requerida para um link de rádio através de uma distância conhecida.

As equações (3) e (4) expressam a perda no caminho em termos da relação logarítmica da potência em unidades de dB.

$$\text{dB} = 10 \log(P_1 / P_2) \quad (5)$$

Uma relação de potência expressa em dB é uma grandeza sem unidade. A potência pode também ser expressa como uma relação relativa a uma referência conhecida. A grandeza logarítmica normalmente usada, dBm, é uma relação da potência relativa à 1 mW, conforme fornecido em (6).

$$\text{dBm} = 10 \log(P / 1 \text{ mW}) \quad (6)$$

As relações de potência absoluta e relativa em dB e dBm podem ser combinadas pela adição e subtração ao invés de multiplicação e divisão, que é o motivo pelo qual são amplamente usadas.

O uso de dB e dBm nos cálculos da potência está demonstrado no exemplo de um link de rádio da Fig. 7.

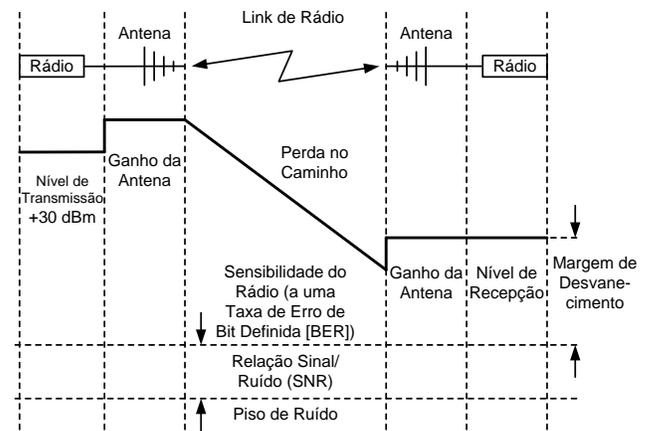


Fig. 7. Link de Rádio Ponto-a-Ponto

Se a potência de transmissão for 30 dBm (1W) a 915 MHz e os ganhos da antena de transmissão e recepção forem 2 dB cada, qual é a potência no rádio de recepção a 25 milhas? Isso pode ser representado através de (7).

$$P_R(\text{dBm}) = P_T(\text{dBm}) + G_T(\text{dB}) + G_R(\text{dB}) - L_p(\text{dB}) \quad (7)$$

onde:

P_R é a potência recebida.

P_T é a potência transmitida.

G_T e G_R são os ganhos da antena do transmissor e receptor, respectivamente.

L_p é a perda no caminho (4).

Para este problema, $L_p(\text{dB}) = 123.8 \text{ dB}$.

A potência no receptor a 25 milhas é $P_R(\text{dBm}) = 30 \text{ dBm} + 2 \text{ dB} + 2 \text{ dB} - 123.8 \text{ dB} = -89.8 \text{ dBm}$.

A equação da perda no caminho do espaço livre de (4) fornece o valor mais otimista (mais baixo) para a perda de propagação de RF em um link de rádio, pois não considera a

interferência do terreno, construções, condições atmosféricas e fatores climáticos, ou a atenuação devida aos múltiplos caminhos que afetam de forma adversa a propagação do rádio no mundo real. Equações de perda de propagação mais sofisticadas são usadas quando for exigida uma análise mais completa da perda no caminho.

D. Sensibilidade do Receptor

Os cálculos das perdas no caminho mostrados na seção anterior fornecem a potência do sinal recebido de um link de rádio para uma determinada potência de transmissão e distância. A especificação da sensibilidade do receptor indica se o rádio terá capacidade para decodificar as informações recebidas. A sensibilidade do receptor é uma medida importante do desempenho do sistema de rádio, pois ela define o nível mais baixo do sinal que o rádio poderá detectar e ainda fornecer um link de comunicação confiável. Quanto menor for o nível de potência que o receptor pode processar com sucesso, melhor será a sensibilidade do receptor. Para um rádio receptor de dados, a sensibilidade é definida em termos da taxa de bits errados (“Bit Error Rate” – BER) no valor limite da sensibilidade. Este valor de BER fornece uma medida da qualidade do link de rádio no nível da potência para a qual a sensibilidade do receptor é especificada. Em geral, o limite de BER usado nas especificações da sensibilidade do receptor estará entre 10^{-3} e 10^{-6} , onde os valores menores de BER representam melhor qualidade do link. Uma melhor sensibilidade do receptor (limite de sensibilidade mais baixo) significa que é requerida uma potência de transmissão menor para um link confiável através de uma distância especificada ou que a distância entre os rádios pode ser aumentada para uma determinada potência de transmissão.

A sensibilidade do receptor é uma função do ruído térmico (P_N), BW do canal, taxa de bits, tipo de modulação e da figura de ruído do receptor. Esses termos estão discutidos abaixo.

O ruído térmico existe em todos os sistemas eletrônicos; ele é uma função da temperatura e faixa da frequência sobre a qual a potência do ruído está sendo medida. Para qualquer sistema, a potência do ruído térmico é fornecida através de (8).

$$P_N = kTB \quad (8)$$

onde:

P_N é a potência do ruído térmico.

k é a constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$).

T é a temperatura em kelvin (a temperatura da sala é 290°K).

B é a BW de interesse (para sistemas de comunicação via rádio, esta é a BW do canal) [1].

A BW do canal é a faixa de frequência ocupada pelo canal simples do link do rádio. Para rádios não-licenciados da América do Norte, as BWs do canal são tipicamente de 200 a 250 kHz.

A taxa de bits é o número de bits transmitidos através de um link de rádio por segundo, tipicamente em torno de 100 Kbps.

As técnicas de modulação incluem o seguinte:

- FSK é o esquema de modulação onde a frequência do sinal é chaveada entre dois valores para representar um bit um ou zero na sequência de dados digitais.
- Com a modulação por chaveamento de fase (“Phase shift keying” – PSK), a fase do sinal é chaveada entre dois ou quatro diferentes estados para representar uns e zeros na sequência de dados.
- PSK usando dois estados de fase é denominada modulação por chaveamento de fase binária (“Bi-phase shift keying” – BPSK).
- PSK usando quatro estados de fase é denominada modulação por chaveamento de fase em quadratura (“Quadrature phase shift keying” – QPSK).

A relação do sinal pelo ruído (“signal-to-noise ratio” – SNR) é a relação da potência total do sinal do rádio pela potência do ruído no canal do rádio. É uma medida fundamental da qualidade do sinal de rádio recebido. Valores maiores de SNR do receptor indicam um link de rádio de qualidade superior. SNR é usualmente fornecida como uma grandeza em dB. Para um rádio FM, uma SNR de 6 dB ou maior é requerida para uma qualidade aceitável do sinal recebido. Para um rádio de dados não-licenciado, são exigidos valores de SNR de 6 a 12 dB de forma a obter uma BER de 10^{-3} a 10^{-6} .

A figura de ruído do rádio é uma medida que representa o quanto os circuitos do rádio degradam a SNR de um sinal de entrada e tem impacto direto na sensibilidade do rádio.

E_b/N_o é outra figura de mérito para sistemas de comunicação modulados digitalmente e é a relação da energia transmitida por bit dividida pela densidade espectral da potência do ruído. E_b/N_o é usada para comparar o desempenho relativo de vários esquemas de modulação digital, pois é independente da BW do canal e taxa de bits. E_b é a potência total do sinal transmitido dividida pela taxa de bits. N_o é a potência de ruído em uma BW de 1 Hz fornecida por (8) e é igual a -174 dBm.

Nos sistemas de comunicação modulados digitalmente, BER pode ser plotada como uma função de E_b/N_o . A Fig. 8 mostra gráficos de E_b/N_o para esquemas comuns de modulação digital.

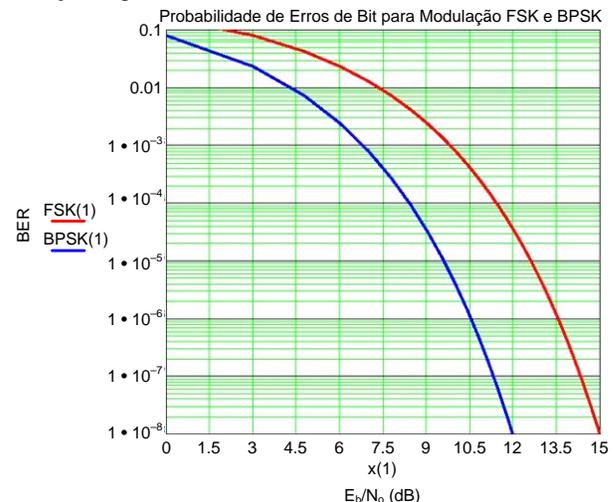


Fig. 8. BER Versus E_b/N_o para Modulação FSK e BPSK

Esses valores de E_b/N_o precisam ser convertidos para valores de SNR para calcular a sensibilidade do receptor. SNR está relacionada às curvas de E_b/N_o através da relação da taxa de bits pela BW do canal, conforme mostrado em (9) e (10).

$$SNR = \frac{E_b}{N_o} \cdot \frac{\text{Bit Rate}}{\text{Channel BW}} \quad (9)$$

Ou em dB:

$$SNR \text{ (dB)} = E_b / N_o \text{ (dB)} + 10 \log \frac{\text{Bit Rate}}{\text{Channel BW}} \quad (10)$$

Para uma determinada BER, esquemas típicos de modulação QPSK têm uma BW do canal igual à taxa de bits, enquanto os esquemas BPSK e FSK têm, tipicamente, uma BW do canal igual a duas vezes a taxa de bits [1].

A sensibilidade do receptor do rádio pode ser expressa através de (11).

$$\text{Sensitivity} = N_{o(\text{dBm})} + 10 \log \left(\text{Channel BW}_{(\text{dB})} \right) + \text{SNR @ BER}_{(\text{dB})} + \text{Radio Noise Figure}_{(\text{dB})} \quad (11)$$

Os primeiros três termos de (11) definem o limite inferior ideal da sensibilidade do receptor para uma determinada BW do canal, tipo de modulação e BER desejada. A figura de ruído do rádio degrada o desempenho do sistema em relação a este limite ideal. Quanto menor for a figura de ruído do rádio, menor será a degradação da sensibilidade em relação a seu limite teórico.

Use (11) para calcular a sensibilidade do receptor. Para um rádio FSK com taxa de bits de 100 kbps, uma BW do canal de 200 kHz, uma BER desejada de 10^{-6} e uma figura de ruído do rádio de 10 dB, a sensibilidade pode ser calculada de acordo com o seguinte:

$$N_o = -174 \text{ dBm (densidade espectral da potência do ruído térmico)}$$

$$10 \log(200 \text{ kHz}) = 53 \text{ dB}$$

SNR para BER de 10^{-6} : da Fig. 8, $E_b/N_o = 13.5$; como este rádio tem uma relação da taxa de bits/BW de 1/2, a SNR será 3 dB menos do que E_b/N_o , logo SNR = 10.5 dB.

$$\text{Receiver Sensitivity} = -147 \text{ dBm} + 53 \text{ dB} + 10.5 \text{ dB} + 10 \text{ dB} = -100.5 \text{ dBm} \quad (12)$$

E. Seletividade do Receptor

Seletividade é uma medida da capacidade de um rádio em receber o sinal “in-channel” desejado na presença de um sinal de interferência “out-of-channel” não desejado. Assim como ocorre com a sensibilidade do rádio, a seletividade é especificada em termos de uma BER desejada. Além disso, ela é especificada em termos de quanto o sinal de interferência “out-of-channel” está próximo do canal desejado. A separação da frequência do sinal desejado e do sinal não desejado pode ser definida em termos dos canais ou em hertz.

A seletividade do rádio é determinada principalmente pela qualidade do filtro do canal usado no projeto. Quanto mais acentuada for a inclinação da rampa de atenuação do filtro do canal e quanto melhor for a atenuação do “out-of-channel” resultante, melhor será a seletividade do rádio. A seletividade

é menor para os canais imediatamente adjacentes ao canal desejado e melhora à medida que aumenta a separação da frequência do sinal indesejado.

Conforme mostrado na Fig. 9, a seletividade do rádio é medida ajustando-se o nível do sinal “in-channel” desejado em 3 dB acima do nível de sensibilidade do rádio (a potência recebida na qual a BER especificada é obtida). Um sinal de interferência “out-of-channel” é então introduzido, para um *offset* de frequência específica, e sua potência é aumentada até que a BER do sinal “in-channel” aumente e atinja o limite de sensibilidade. A seletividade é definida como a relação da amplitude do sinal “out-of-channel” pelo sinal “in-channel” em dB.

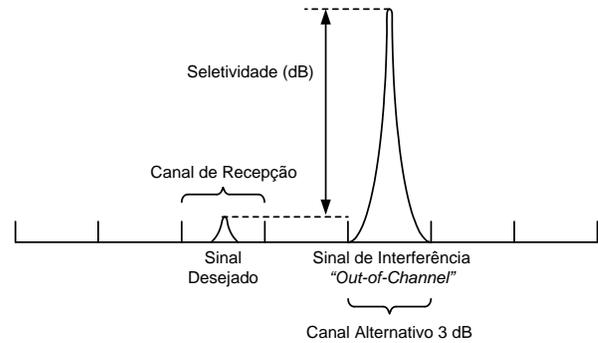


Fig. 9. Seletividade do Receptor

F. Padrões e Ganho da Antena

As antenas são os elementos de irradiação de um sistema de rádio que possibilitam a propagação eficiente das ondas do rádio. Antenas são dispositivos passivos que não alteram os sinais RF ou amplificam a potência RF do rádio. Na melhor das condições, elas podem irradiar somente a potência que é entregue nos seus terminais de entrada. O termo ganho da antena não se refere à amplificação de um sinal; mais propriamente, é a capacidade de uma antena irradiar mais energia RF em uma determinada direção do que uma antena que irradia energia RF uniformemente. O padrão da antena consiste numa visualização gráfica da diretividade relativa da antena. Podem ser gráficos bidimensionais mostrando a potência irradiada no plano horizontal ou vertical ou um corpo sólido tridimensional mostrando a potência irradiada em todas as direções no espaço.

A Fig. 10 mostra os dois tipos básicos de antena: onidirecional (multidirecional) e direcional. Antenas onidirecionais, tal como uma dipolo de meia onda, têm a mesma potência irradiada em todas as direções num plano perpendicular ao eixo da antena. O padrão de radiação para uma antena dipolo orientada verticalmente é semelhante a um *donut* sem um buraco no plano horizontal com ganho igual em todas as direções no plano horizontal. Antenas direcionais, tais como as antenas Yagi multielementos, são projetadas para irradiar uma quantidade maior de sua potência em uma direção do que em outras direções; elas têm um padrão de radiação com um lóbulo principal em uma direção que se parece com um bastão de baseball pequeno e achatado com lóbulos laterais menores e um lóbulo traseiro pequeno na direção oposta ao lóbulo principal.

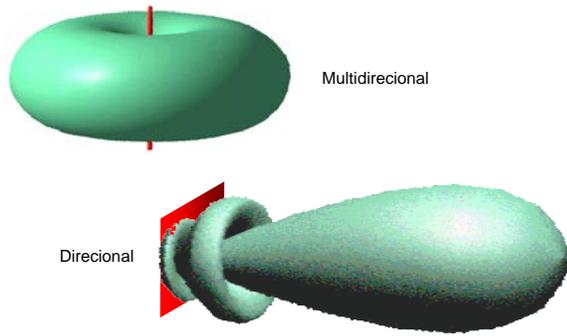


Fig. 10. Antenas Direcionais e Onidirecionais (Multidirecionais)

Os ganhos das antenas direcionais são definidos em relação àqueles de um radiador isotrópico ideal ou um radiador dipolo de meia onda. Um radiador isotrópico é um radiador pontual com um padrão de ganho esférico que têm a mesma potência irradiada em todas as direções, conforme mostrado na Fig. 11.

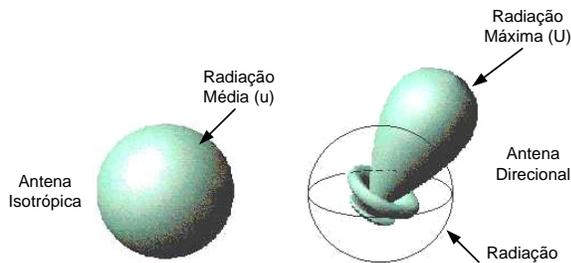


Fig. 11. Ganho da Antena Direcional

O valor de referência dBi indica um ganho da antena em relação a um radiador isotrópico, enquanto dBd é usado para indicar o ganho relativo a um radiador dipolo de meia onda. Um dipolo de meia onda tem um ganho de 2.15 dBi. O padrão do ganho de uma antena direcional é definido em termos da largura do feixe em graus angulares em relação à direção do maior ganho em ambas as direções horizontal e vertical. A largura do feixe é geralmente especificada como o ponto no qual o ganho da antena é de 3 dB abaixo do máximo.

As antenas são dispositivos ressonantes sintonizados; como tal, elas operam de forma eficiente dentro de uma banda de frequência relativamente estreita ao redor de uma frequência central para a qual elas foram projetadas. A BW de uma antena é usualmente definida em algum valor baixo da relação de ondas estacionárias de tensão (“Voltage Standing Wave Ratio” – VSWR), uma medida da potência refletida, onde a maior parte da potência incidente está sendo irradiada pela antena. Tipicamente, as antenas têm BWs da ordem de 10% de sua frequência central.

A eficiência de radiação de uma antena depende da compatibilidade da impedância entre a linha de transmissão conectada às entradas da antena e a própria estrutura da antena. Usualmente, um sistema de compatibilização é projetado na entrada da antena de forma a obter uma compatibilização adequada da impedância. Uma compatibilização inadequada da impedância vai impactar de forma adversa a eficiência da radiação e/ou o ganho da antena.

Esta perda da eficiência afeta igualmente a transmissão e a recepção.

As antenas direcionais dão dispositivos multielementos com um único elemento de acionamento e múltiplos elementos passivos. Uma antena Yagi (mostrada na Fig. 12) tem um único refletor passivo na direção oposta à direção de radiação desejada, um único elemento de acionamento denominado radiador, e um ou mais elementos diretores passivos que ajudam a fornecer o ganho direcional da antena.

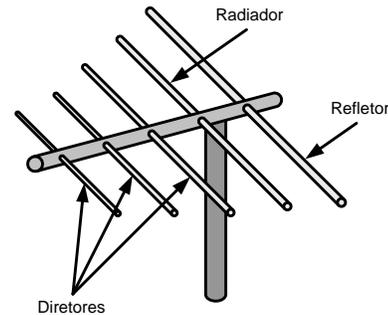


Fig. 12. Antena Yagi

G. Técnicas “Spread-Spectrum”

Um sistema de espalhamento espectral (“spread-spectrum”) é aquele onde uma faixa mais ampla de banda de frequências é utilizada para transmitir um sinal, quando comparada à faixa mínima requerida para transmitir as informações desejadas. Esta BW adicional é usada para fornecer um link de comunicação confiável na presença de sinais de interferência ou ruídos de alto nível. O Teorema da Capacidade do Canal de Shannon-Hartley define o limite superior da transmissão de dados livre de erros dentro de uma BW especificada de acordo com (13).

$$C = B \cdot \log_2(1 + S/N) \quad (13)$$

onde:

C é a capacidade do canal em bits por segundo.

B é a BW do canal em hertz.

S/N é a relação da potência do sinal pelo ruído (também referida como SNR).

Esta equação pode ser rearranjada para fornecer a mínima SNR para transmitir uma determinada taxa de dados em uma determinada BW, conforme mostrado em (14).

$$SNR_{(dB)} = 10 \cdot \log \left(2^{\left(\frac{C}{B}\right)} - 1 \right) \quad (14)$$

Para uma taxa de dados fixa C , aumentar a BW B significa que a SNR mínima para a transmissão de dados livre de erros pode ser menor. Na verdade, para valores de B maiores do que C , a SNR pode realmente ser negativa, significando que uma comunicação confiável pode ser mantida com um nível de ruído de fundo maior do que o sinal desejado. Aumentar a BW do canal para permitir uma comunicação confiável na presença de ruído e sinais de interferência de alto nível consiste no objetivo principal das técnicas “spread-spectrum”.

O processamento “spread-spectrum” permite a expansão da BW do sinal em até vários níveis de magnitude através de um código acoplado ao canal de comunicação. A relação entre a BW do sinal espalhado e a BW do sinal original (“Base Band” – Banda Base [BB]) é conhecida como ganho de processamento (“processing gain” – PG).

Um sistema de comunicação “spread-spectrum” típico está mostrado na Fig. 13.

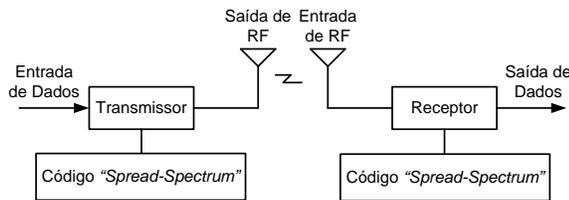


Fig. 13. Sistema “Spread-Spectrum”

Na Fig. 13, ambos o transmissor e o receptor compartilham um código predefinido de espalhamento espectral (“spread-spectrum code”) para comunicação sem fio com sucesso. Os dados de entrada são combinados através deste código e introduzidos no bloco transmissor. Na extremidade receptora, o receptor usa o mesmo código para extrair os dados do sinal RF.

Isso pode ser explicado no domínio da frequência, conforme mostrado na Fig. 14.

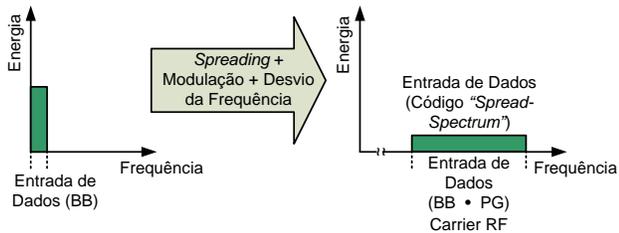


Fig. 14. “Spreading” do Sinal

No bloco de transmissão, os dados de entrada (taxa BB) são submetidos às operações de espalhamento (“spreading”) e modulação e são “espalhados” na frequência, assim como ocorre o desvio da frequência (para transmissão sem fio). Na extremidade receptora, a operação inversa ao espalhamento (“despreading”) e a demodulação são executadas para extrair os dados originais, conforme mostrado na Fig. 15.

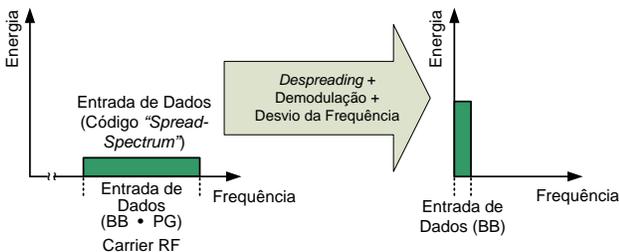


Fig. 15. “Despreading” do Sinal

Existem muitas técnicas “spread-spectrum” diferentes disponíveis atualmente, diferenciadas pelo ponto onde o código “spread-spectrum” é introduzido no canal de comunicação. Duas das importantes técnicas que são usadas

atualmente nos rádios são: Espalhamento Espectral por Sequência Direta (“Direct-Sequence Spread Spectrum” – DSSS) e Espalhamento Espectral por Salto de Frequência (“Frequency-Hopping Spread Spectrum” – FHSS).

Num rádio DSSS, o código “spread-spectrum” é aplicado diretamente aos bits dos dados de entrada. O resultado disso é introduzido para a modulação e desvio da frequência de forma a gerar o carrier RF desejado para a transmissão. Na verdade, um sistema DSSS espalha os dados transmitidos através de uma BW ampla, multiplicando os dados por meio de um código de espalhamento. Isso permite que o sistema DSSS forneça imunidade ao ruído, bem como aos sinais de interferência.

Num rádio FHSS, o código “spread-spectrum” é aplicado ao carrier RF, o que resulta na transmissão de dados em várias frequências do carrier, uma vez que o carrier salta de frequência em frequência. Em um sistema FHSS, o sinal salta rapidamente através de múltiplos canais, o que permite evitar um sinal de interferência fixo. Os espectros de frequência para DHSS e FHSS estão mostrados na Fig. 16 e Fig. 17.

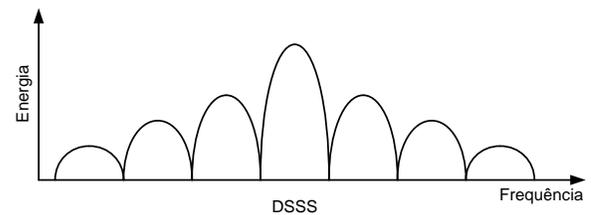


Fig. 16. Espectro de DSSS

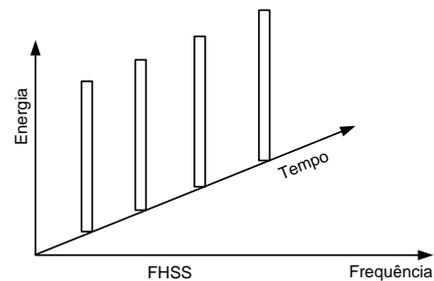


Fig. 17. Espectro de FHSS

Uma das diversas vantagens da tecnologia “spread-spectrum” inclui a resistência à interferência e “jamming”. Sinais de *jamming* intencionais ou não-intencionais são rejeitados pelo receptor uma vez que eles não contêm o código “spread-spectrum” apropriado. Isso está ilustrado na Fig. 18, que descreve o sistema DSSS.

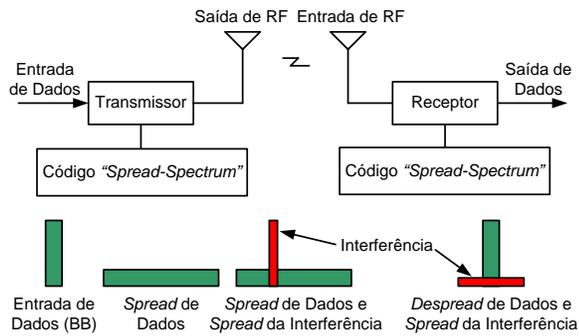


Fig. 18. Ganho no Processamento do Sinal de Interferência do DSSS

Na Fig. 18, o sinal de interferência é combinado com o sinal desejado após o sinal RF ser transmitido pela antena. O sinal de interferência e os sinais desejados são recebidos na extremidade de recepção e são submetidos aos processos de “despreading” e demodulação. O sinal desejado é recuperado e o sinal de interferência é rejeitado, pois ele não tem o código apropriado. O sinal de interferência está mostrado no domínio da frequência, antes e após o processo de “despreading”, com o objetivo de ilustrar este processo.

Ambos os sistemas FHSS e DSSS são adequados no que se refere a resistir às interferências de transmissores de rádios próximos. Como as frequências estão sempre variando num sistema FHSS, isso pode evitar um “jammer” (um transmissor especificamente projetado para obstruir transmissões de rádio em uma determinada frequência). Conforme ilustrado acima, um sistema DSSS evita interferências minimizando-as por meio de sua função “spreading”. Os rádios com “spread-spectrum” são adequados para evitar fontes comuns de interferência tais como os sinais que permanecem numa faixa de frequência estreita e não se movem.

Este não é o caso quando múltiplos rádios “spread-spectrum” estão operando em áreas próximas. Por exemplo, quando houver mais sistemas FHSS operando na mesma banda de frequência, mais sistemas estarão saltando para a mesma frequência simultaneamente e distorcendo os dados que têm que ser transmitidos em tal frequência.

Os rádios DSSS são adequados, até certo ponto, para resistir às interferências, porém se a interferência combinada ao longo da banda aumentar até certo nível, a comunicação é drasticamente reduzida a quase zero. Por exemplo, é necessário apenas um pequeno número de sistemas FHSS próximos para incapacitar um sistema DSSS. Por outro lado, se um sistema DSSS estiver transmitindo ao longo de toda a banda, um sistema FHSS pode estar incapacitado para encontrar um canal limpo para o qual ele possa saltar. Em resumo, um sistema FHSS degrada-se de forma mais suave do que um DSSS, porém ambos sofrem degradação no desempenho quando estão operando um perto do outro [3] [4].

H. Tipos de Link (Ponto-a-Ponto, Ponto-Multiponto e Repetidor)

Importantes links de rádio com linha de visada podem ser estabelecidos ao longo de uma ampla faixa de distâncias, dependendo das capacidades do rádio e adequabilidade do caminho. Rádios não-licenciados são geralmente limitados a distâncias da ordem de 20 a 30 milhas. Esses links de rádio

podem ser configurados de várias formas, dependendo das necessidades do usuário.

Um sistema ponto-a-ponto (mostrado na Fig. 19) consiste em um par de rádios comunicando-se somente um com o outro para fornecer um link de comunicação entre nós específicos de um sistema. Os links do rádio ponto-a-ponto normalmente usam antenas direcionais para maximizar a intensidade do sinal entre os dois rádios e para minimizar a interferência de outras fontes.

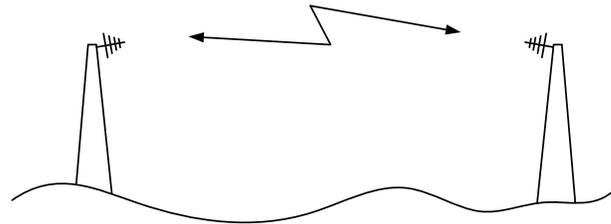


Fig. 19. Link de Rádio Ponto-a-Ponto

Um esquema ponto-multiponto envolve um sistema de rádios com um máster (M) comunicando-se com diversos locais remotos (R1, R2, R3 e R4), conforme mostrado na Fig. 20. Os esquemas ponto-multiponto geralmente usam uma antena multidirecional para o máster em função da necessidade de transmitir o sinal de forma mais ampla.

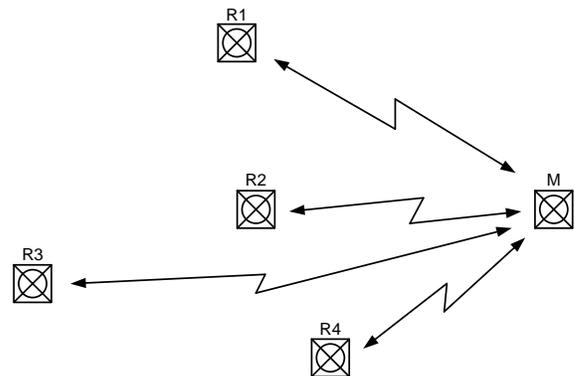


Fig. 20. Link de Rádio Ponto-Multiponto

Um repetidor usa múltiplos rádios em um esquema ponto-a-ponto para estabelecer um link onde um único caminho com linha de visada não é viável. Os rádios repetidores são instalados em um ponto intermediário (ou pontos) do caminho entre as extremidades do link para retransmitir os sinais mais remotos para a extremidade oposta do link ou para outro repetidor ao longo do caminho. Os repetidores são usados onde a linha de visada entre as extremidades do link é obscura ou onde o comprimento do caminho excede a faixa de um único par de rádios. Este tipo de esquema está mostrado na Fig. 21 e usa antenas direcionais para maximizar o ganho e minimizar a interferência.

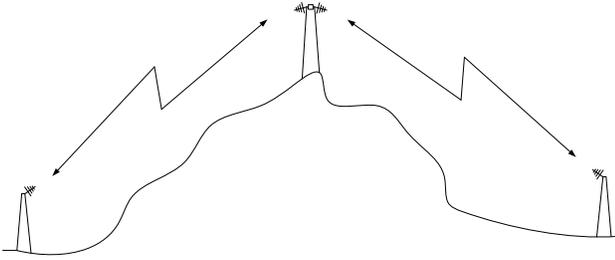


Fig. 21. Link de Rádio com Repetidor

III. PARÂMETROS DO SISTEMA PARA PROTEÇÃO DO SISTEMA DE POTÊNCIA

Ao utilizar a tecnologia baseada nos rádios nas aplicações de proteção e controle, diversos fatores têm um papel importante no desempenho global do sistema e devem ser considerados. Os sistemas de rádios não-licenciados têm a vantagem de custar muito menos do que aqueles que usam fibra óptica ou fio piloto, porém existem novos desafios para que o canal do rádio atenda aos mesmos requisitos das soluções através de cabos. Os cinco itens seguintes devem ser avaliados ao selecionar os rádios para as aplicações de proteção e controle:

- Latência
- Disponibilidade
- Segurança e confiabilidade
- Robustez para ambientes agressivos
- Criptografia

A. Latência

A minimização da latência do link de rádio é crítica para as operações de alta velocidade. Os rádios antigos disponíveis para o mercado de controle não eram adequados a tais aplicações porque eles eram projetados para transmissão de grandes quantidades de dados armazenados em *buffer* para superar a indisponibilidade do canal. Isso provocava atrasos enormes na operação, causando, em alguns casos, operações indesejadas. Hoje, os rádios mais novos possuem modos de operação que permitem que o *buffer* seja desligado ou incluem modos de operação especiais para suportar protocolos específicos projetados para controle. A seleção do protocolo e a latência do rádio, em conjunto, têm um efeito significativo no desempenho do sistema e latência global.

Nas aplicações do rádio para um esquema de proteção por fio piloto ou para controle de alta velocidade, a máxima latência permitida para o rádio varia entre 1.5 e 2 ciclos. Ao avaliar a latência do rádio, é importante conhecer a latência máxima e mínima para um link de rádio de boa qualidade. Rádios “spread-spectrum” bem populares sempre têm uma latência variável; dependendo de como o fabricante projetou o rádio, vai apresentar uma pequena ou grande variabilidade na latência. A latência, juntamente com a disponibilidade do link, fornece a latência máxima, mínima e média real esperada para uma determinada operação.

B. Disponibilidade

A disponibilidade do link de rádio é a relação do tempo que o link do rádio fornece dados adequados pelo tempo que o

rádio transmite dados. A disponibilidade do link de rádio varia entre os fabricantes de rádio e entre os próprios links. A disponibilidade do link é normalmente fornecida pelo rádio após o mesmo entrar em operação. Existem várias maneiras de os fabricantes calcularem a disponibilidade do link do rádio, mas todas levam praticamente aos mesmos resultados. Os cálculos da disponibilidade podem ser efetuados baseando-se nos dados do protocolo transferidos ou no link do rádio ou *frame* completo. A disponibilidade é fornecida em valores percentuais e pode incluir detalhes da disponibilidade por-frequência. Para qualquer método, o link deve ser montado e operado durante, pelo menos, alguns dias antes de usar os números de disponibilidade para uma operação de longo prazo (para o direcionamento das antenas efetuado inicialmente, 10 a 20 minutos de operação é suficiente). Períodos maiores de tempo de operação em serviço com sucesso levam a disponibilidades maiores. Para as aplicações de proteção e controle, o requisito amplamente aceito para disponibilidade do link de rádio varia de 95% a 99.95%. Isso equivale a uma variação de 265 minutos a 438 horas de interrupção por ano. Uma disponibilidade de 95% é adequada para melhorar a qualidade de energia ou agilizar o controle através da operação primária já implementada. Uma disponibilidade de 99.95% é suficiente para linhas de transmissão que requerem sistemas de proteção redundantes. A disponibilidade e a latência são usadas para calcular o desempenho global do sistema [5].

C. Segurança e Confiabilidade

Uma melhor disponibilidade do link melhora diretamente a confiabilidade. Uma melhor confiabilidade indica que quando o sistema é solicitado a operar, ele vai operar dentro da latência requerida para o sistema na presença de interferência ou ruído. À medida que a disponibilidade é reduzida, a confiabilidade também diminui; logo, o sistema não vai operar conforme for solicitado. A norma IEC 60834-1 indica como calcular e testar a confiabilidade e segurança de um sistema.

A segurança de um sistema é a capacidade de um link operar corretamente quando solicitado e não operar quando não for solicitado. A segurança do link de rádio depende enormemente do protocolo usado. A segurança é definida na norma IEC 60834-1 e pode ser calculada através de (15).

$$P_u \approx \frac{N_u}{N_{Err}} \quad (15)$$

onde:

P_u é a probabilidade de um comando não desejado, e $1 - P_u$ é a segurança.

N_u é o número de comandos não desejados.

N_{Err} é o número de *bursts* de erros no canal de comunicação.

A segurança do link do rádio depende enormemente do protocolo usado e das capacidades de detecção de erros do rádio. Os fabricantes de rádio devem fornecer esses números para rádios específicos e protocolos específicos [6].

D. Robustez para Ambientes Agressivos

A robustez e resistência do rádio são importantes para uma operação segura e confiável. O rádio deve atender às mesmas normas de testes de tipo e requisitos de temperatura aplicados aos relés. O esquema é apenas tão bom quanto o link mais fraco. Os rádios usados nas aplicações de proteção e controle devem atender ou superar os requisitos da norma IEEE 1613, a qual relaciona todos os testes de tipo necessários para validar se um dispositivo é robusto o suficiente para ser usado na comunicação de subestações de energia elétrica.

E. Criptografia

Um link de comunicação seguro que não pode ser comprometido ou manipulado por intrusos é importante quando a comunicação via rádio estiver sendo usada para transmissão de informações sensíveis. Até certo ponto, as técnicas de espalhamento espectral (“spread-spectrum”) e de salto de frequência (“frequency-hopping”) tornam mais difícil para um intruso detectar e decodificar um link de rádio; porém, elas não fornecem uma real segurança dos dados. Para alguém que estiver usando modernos equipamentos de detecção, é bastante simples efetuar o rastreamento e decodificação tanto do link DSSS quanto do FHSS. A criptografia tem que ser utilizada para fornecer segurança dos dados.

Criptografia é o processo que usa um algoritmo, denominado criptograma, para transformar as informações do usuário num formato ilegível de forma a evitar o acesso e uso dessas informações por qualquer indivíduo que não possua a chave do criptograma. Historicamente, as técnicas de criptografia têm sido baseadas na substituição (substituindo a letra ou bloco de letras original por uma letra ou bloco de letras diferente do alfabeto através de uma chave de substituição disponibilizada para o transmissor e receptor) e rearranjo, também conhecido como permutação (rearranjo das letras no texto original de acordo com uma chave predefinida).

Os modernos algoritmos de criptografia eletrônica continuam a usar essas técnicas de uma forma muito mais sofisticada para fornecer segurança cibernética para a indústria de energia elétrica. O algoritmo de criptografia da AES (“Advanced Encryption Standard” – Padrão de Criptografia Avançada) é amplamente usado atualmente em função da segurança fornecida pelo mesmo e porque ele pode ser implementado de forma eficiente tanto no hardware quanto no software. Este algoritmo utiliza um padrão de criptografia de chave simétrica com múltiplos níveis de transformação, cada qual consistindo em processos de substituição e permutação, incluindo um que depende da chave do criptograma. O algoritmo opera com base em blocos de dados de 128 bits usando uma chave de 128, 192 ou 256 bits. Este algoritmo tem sido usado pelo governo dos Estados Unidos para proteção de dados, inclusive do nível máximo de informações confidenciais (“top-secret level”). Quanto mais extensa for a chave, mais níveis de transformação são usados no algoritmo e mais seguro será o processo de criptografia.

A análise acadêmica (ataque) do algoritmo da AES gerou diversos debates sobre se ele pode, realmente, ser quebrado,

porém levou os especialistas a não acreditarem que um método prático de interceptação dos dados criptografados de acordo com o padrão AES possa algum dia ser descoberto. Contudo, a fragilidade máxima de qualquer esquema de criptografia é a falta de cuidado do usuário em relação à segurança e acesso à chave. Se os hackers puderem obter a chave usada em um esquema de criptografia, eles estarão vencendo a segurança uma vez que efetivamente eles quebraram o criptograma propriamente dito, com pouquíssimo esforço.

Sistemas sem fio seguros e confiáveis requerem um trabalho inicial maior do que os sistemas com fio. As normas IEEE 1613 e IEC 60834-1 ainda são aplicadas quando são usados links sem fio para comunicação e podem ajudar a projetar os esquemas de proteção e controle. Um trabalho em conjunto com os fabricantes, associado ao uso de normas e informações disponíveis sobre rádios, ajuda a garantir um desempenho aceitável dos sistemas de rádios.

IV. APLICAÇÕES DE RÁDIOS

A. Regiões da ITU

As regulamentações dos rádios são determinadas numa base país-por-país. Não existe um órgão internacional abrangente com autoridade legal. Ao invés disso, os países se encontram a cada quatro anos na Conferência Mundial de Radiocomunicações (“World Radiocommunications Conference” – WRC) organizada pela União Internacional de Telecomunicações (“International Telecommunications Union” – ITU). Essas reuniões geram recomendações que têm de ser adotadas por cada país para que tenha o efeito de lei. Alguns países são bem próximos uns dos outros ou compartilham fronteiras comuns. Outros países são distantes uns dos outros. Para simplificar a coordenação, a ITU divide o mundo em três regiões de rádio, conforme mostrado na Fig. 22. As Américas do Norte e Sul, incluindo o Caribe, estão localizadas na Região de Rádio 2.

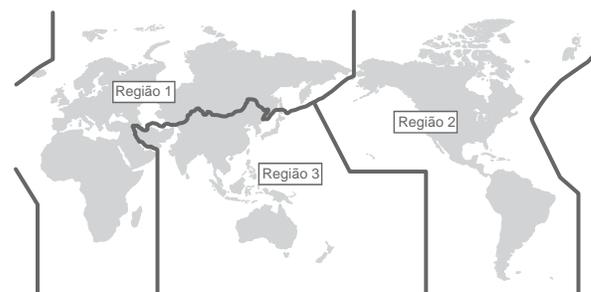


Fig. 22. Regiões de Rádio da ITU no Mundo

B. Rádios Licenciados Versus Não-Licenciados

Todos os projetos de rádio têm que ser certificados pelo órgão nacional antes que possam ser usados em um país. Usualmente, isso é feito pelo fabricante ou por um importador de rádios fabricados no exterior. Para usar um rádio, uma licença é geralmente exigida; múltiplos rádios podem requerer múltiplas licenças.

Existe um número limitado de bandas de frequência que são não-licenciadas ou isentas de licença. As mais

significativas são as bandas industriais, científicas e médicas (“Industrial, Scientific, and Medical” – ISM). Na Região de Rádio 2, as bandas ISM mais conhecidas são a banda de 915 MHz, banda de 2.4 GHz (usada para Wi-Fi®) e banda de 5.8 GHz (“Unlicensed National Information Infrastructure” – UNII). Para as aplicações de comunicação, essas bandas geralmente usam algum tipo de tecnologia “spread-spectrum” para limitar os efeitos da interferência.

C. FCC, IC e COFETEL

No Tratado Norte-Americano de Livre Comércio (“North American Free Trade Agreement” – NAFTA), cada um dos três países tem seu próprio órgão governamental que regulamenta o uso do rádio. No Canadá, é o IC (“Industry Canada”); no México, o COFETEL (“Comisión Federal de Telecomunicaciones”); e nos Estados Unidos, o FCC (“Federal Communications Commission”). Esses três órgãos criam regulamentos para diferentes partes do espectro do rádio. As decisões são baseadas nas decisões governamentais que equilibram os interesses nacionais, interesses do consumidor, acordos internacionais (tais como aqueles da aviação), requisitos da indústria, recomendações da WRC e cooperação com os vizinhos.

As bandas de maior utilidade para os sistemas de proteção elétrica e sub-bandas importantes estão descritas na Tabela I.

TABELA I
IMPORTANTES FAIXAS DO RÁDIO PARA USO DA CONCESSIONÁRIA

Frequência	Comprimento de Onda	Banda	Descrição
30 a 300 MHz	10 a 1 m	VHF	Frequência muito alta.
300 a 3,000 MHz	1,000 a 100 mm	UHF	Frequência ultra-alta. Várias bandas ISM 400 MHz (RR1, RR3*). Bandas p/ dispositivo de curto alcance 868 (“short-range device” – SRD) (RR1, RR3*). Banda ISM 915 MHz (RR2*). Banda ISM 2.4 GHz. Banda da concessionária 3.65 GHz (USA).
3 a 30 GHz	100 a 10 mm	SHF	Frequência super-alta. Banda 5.8 UNII.

*RR1, RR2 e RR3 são Regiões de Rádio 1, 2 e 3 da ITU

D. Perspectiva do Engenheiro de Proteção

Nem todos os rádios podem ser usados em todas as partes do mundo. A coordenação por região de rádio fornece certo nível de similaridade regional. A cooperação entre os governos dos Estados Unidos e Canadá e uma maior coordenação com o México, devido ao NAFTA, estão propiciando um aumento na oferta de produtos que podem ser usados em todos os três países. Um engenheiro de proteção trabalhando dentro de um único país precisa usar a banda disponível mais apropriada neste país e garantir que os rádios estejam autorizados para serem usados neste país. Engenheiros

de proteção trabalhando além das fronteiras do país ainda são responsáveis em certificar-se que tipos de rádios individuais são aprovados em cada país onde serão usados. O uso dos mesmos rádios nos países do NAFTA e vizinhos próximos está se tornando mais fácil à medida que aumenta a cooperação entre as autoridades.

V. IMPLEMENTAÇÃO DOS LINKS DE RÁDIO

Existem muitas ferramentas disponíveis para ajudar a implementar um link de rádio sem necessidade de um alto investimento inicial e extenso conhecimento sobre os rádios. O primeiro passo consiste no estudo do caminho. Diversos fabricantes de rádio oferecem um estudo do caminho sem custos. Este estudo do caminho não garante que o link vá funcionar, mas ajuda a determinar se o link do rádio é viável. O software de estudo do caminho usa os dados do terreno, dados de diversos tipos de obstáculos (“clutters”), informações específicas do rádio, projeto da antena e altura da torre da antena para calcular o estudo do caminho. Os dados do terreno incluem as elevações em diferentes localizações. Os dados dos *clutters* incluem uma aproximação da altura da vegetação dentro de regiões definidas. A maioria dos estudos do caminho não considera construções ou outros obstáculos feitos pelo homem. Esses obstáculos têm que ser adicionados manualmente ao estudo do caminho.

As coordenadas do sistema de informações geográficas (“Geographic Information System” – GIS) de uma torre de antena e a altura máxima das antenas instaladas são entradas necessárias para o estudo do caminho. Os resultados do estudo incluem a disponibilidade do link e o *budget* do link. Outras entradas para um estudo do caminho incluem detalhes de hardware do rádio e projeto da antena. O valor da disponibilidade fornecido pelo estudo do caminho é uma aproximação de como irá funcionar o link, baseando-se nos cálculos dos multicaminhos e propagação. De forma ideal, espera-se que a disponibilidade inicial seja maior do que 99%. Novamente, este número é uma aproximação baseada nos dados introduzidos; logo, os resultados reais vão variar.

Outra importante saída de um estudo do caminho é a margem de desvanecimento (“fade margin”), que é a diferença entre a intensidade do sinal recebido e a máxima sensibilidade do rádio. Para manter um link em boas condições ao mesmo tempo em que minimiza as interrupções do rádio, recomenda-se ter pelo menos 20 dB de margem. Esta margem diminui a probabilidade de que o nível da potência recebida vá degradar para um nível abaixo da sensibilidade do receptor devido aos efeitos de ambientes variáveis, crescimento da vegetação ou radiointerferência. Margens menores do link do rádio ainda vão funcionar, mas podem afetar a disponibilidade do sistema a longo prazo.

Um exemplo de um *budget* do link está mostrado em (16).

$$P_T + G_{AT} + L_P + G_{AR} - M_F \geq R_S \quad (16)$$

onde:

P_T é a potência de transmissão.

G_{AT} é o ganho da antena do transmissor.

L_P é a perda no caminho entre o transmissor e o receptor.

G_{AR} é o ganho da antena do receptor.

M_F é a margem de desvanecimento.

R_S é a sensibilidade do receptor especificada.

A desigualdade indica que a soma dos elementos do lado esquerdo da equação tem que ser maior do que a sensibilidade do receptor do rádio para estabelecer um link de rádio confiável.

Uma ampla seleção de antenas está disponível para as bandas ISM. A maioria dos fabricantes oferece antenas que são mais adequadas à aplicação e testadas para atender às regulamentações da FCC. A maioria dos links ponto-a-ponto usa as antenas de alto ganho Yagi para transmissão sem fio de informações através de longas distâncias sobre um feixe estreito. As antenas Yagi com bandas ISM típicas apresentam ganhos na faixa de 3 dB a 12 dB. Uma antena de ganho superior tem um feixe mais estreito e propaga o sinal para mais longe do que uma antena de ganho inferior. As antenas Yagi têm um ganho em ambos os lados de transmissão e recepção. É melhor deixar o fabricante escolher a antena baseando-se no estudo do caminho. Outras antenas podem ser usadas, porém é necessário prestar atenção para evitar violação das regulamentações.

Ao instalar links de rádio para proteção e controle, deve-se tomar um cuidado especial para garantir a segurança e a confiabilidade das comunicações além daquelas exigidas para os links do Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (“Supervisory Control and Data Acquisition” – SCADA). A escolha da antena Yagi apropriada e o direcionamento adequado da antena são mais críticos nas aplicações de proteção e controle do que na utilização dos rádios para coleta de dados do SCADA. A antena Yagi pode ser polarizada verticalmente ou horizontalmente. A direção da polarização é a direção do campo elétrico irradiado pela antena.

O uso de antenas polarizadas de forma oposta em diferentes links de rádio fornece 20 dB de separação entre os sinais de frequências adjacentes e ajuda a reduzir a interferência entre os links de rádios operando bem próximos um do outro. O uso de um sinal de alta intensidade associado à disponibilidade consiste no fator principal para criação de um link de rádio adequado. A forma mais rápida para comissionar um rádio, preparando-o para ser usado, é usando a Indicação da Intensidade do Sinal Recebido (“Received Signal Strength Indication” – RSSI). Quanto maior for o valor de RSSI, mais forte será o sinal. Uma vez que ambas as antenas estejam posicionadas com a mais alta RSSI, o link do rádio deve ter permissão para operar por 10 minutos ou mais. Após 10 minutos, as antenas devem ser posicionadas em diferentes direções com incrementos de 5 graus. Quando a disponibilidade medida for a mais alta em ambas as extremidades, as antenas são alinhadas para o melhor desempenho. Todas as vezes que a disponibilidade for menor do que 100%, há interferência dos fatores ambientais ou de outros rádios ou interferência dos multicaminhos. Embora as antenas direcionais concentrem a maior parte da potência de um transmissor de rádio ao longo do caminho da linha de visada do link de rádio, parte do sinal pode ser espalhado (“scattered”) pelos objetos (tais como construções, árvores e

cobertura da terra [“land cover”]). Esse espalhamento faz com que múltiplas imagens do sinal transmitido alcancem a antena de recepção a partir de mais de um caminho. Se esses sinais dos multicaminhos se somarem fora de fase com o sinal desejado, eles podem enfraquecer o sinal até o ponto em que o receptor não possa detectá-lo ou vai gerar um número elevado de erros de bits. Quando isso acontece, a detecção de erros do rádio rejeita os dados. Isso é indesejável se um sinal de controle tiver que ser enviado naquele momento. Se o rádio for instalado para uso de dados do SCADA, o rádio vai detectar o erro e retransmitir a mensagem, e os dispositivos das extremidades finais não vão perceber os dados perdidos. O direcionamento das antenas e a minimização da interferência dos multicaminhos propiciam maior segurança e confiabilidade.

Pode ser desejável instalar múltiplos links ponto-a-ponto em subestações que requerem proteção em cada linha. É bastante conveniente e mais barato instalar múltiplos links de rádio com múltiplas antenas localizadas na mesma torre de antenas. Esta montagem requer muito mais atenção e muito cuidado no posicionamento da antena de forma a se aproximar dos mesmos níveis de desempenho de um link ponto-a-ponto dedicado. Por exemplo, para um esquema piloto usando um link de rádio em cada linha de transmissão, é fácil instalar três ou mais links de rádio na subestação para comunicação com a outra extremidade da linha de uma diferente subestação. Idealmente, é econômico instalar todas as três antenas em um poste. A instalação de múltiplas antenas no mesmo poste, operando na mesma banda de frequência, pode resultar em interferência, tendo um impacto significativo no desempenho do link de rádio. Quando uma antena de uma instalação compartilhada com múltiplos links de rádio estiver transmitindo a 36 dBm e uma antena adjacente estiver tentando receber um sinal de uma localização remota a -80 dBm, a interferência do sinal de transmissão degrada a disponibilidade do receptor. A antena transmitindo em um nível alto vai sobrecarregar o sinal de menor nível recebido da localização remota. Existem diversas opções para reduzir o efeito da interferência entre múltiplos links de rádio em um local compartilhado, porém não eliminam inteiramente o problema. A mudança da polarização das antenas fornece uma melhoria de 20 dB na isolamento entre um par de links de rádio. Para três antenas, o aumento da separação entre as mesmas também vai sempre ajudar, pois vai reduzir a potência de transmissão. Contudo, a redução da potência de transmissão reduz a disponibilidade, tempos de operação e confiabilidade. Um método para superar este problema consiste em sincronizar os rádios “spread-spectrum” na localização compartilhada de forma que eles transmitam e recebam exatamente ao mesmo tempo. A sincronização dos rádios reduz a interferência rádio-a-rádio até o nível da diferença dos sinais recebidos, que é geralmente menor do que 20 dB. A maioria dos rádios do mercado pode rejeitar corretamente sinais adjacentes neste nível. Polarizar e mover as antenas de forma a separá-las vai propiciar resultados ainda melhores. A sincronização dos rádios melhora enormemente a

disponibilidade e propicia desempenho comparável a um link de rádio dedicado.

VI. BENEFÍCIOS ECONÔMICOS

A maioria dos esquemas básicos de proteção elétrica opera sem o uso da comunicação. A adição da comunicação tem como resultado uma cobertura mais precisa e operação mais rápida. A maior velocidade de operação reduz o esforço imposto aos componentes elétricos e melhora a confiabilidade e a estabilidade do sistema de potência global. Uma cobertura com melhor precisão ajuda o esquema de proteção a definir onde o evento está localizado e reduz a probabilidade de uma operação incorreta.

Existem muitos métodos diferentes para fornecer comunicação para os esquemas de proteção. Frequentemente, uma consideração primária é o sistema de comunicação. Uma concessionária pode efetuar a contratação (“leasing”) do sistema de comunicação ou instalar um sistema próprio. No primeiro caso, a concessionária cede algum controle e tem que pagar taxas mensais, porém não precisa ter capital para investimento na infraestrutura de comunicação. No caso de o sistema pertencer à concessionária, o cabo de fibra óptica é o padrão ideal, porém a fibra óptica é cara. A instalação dos cabos de fibra óptica nos postes é mais barata do que enterrá-los. Os terrenos rochosos e a infraestrutura densa das áreas urbanas aumentam os custos das instalações subterrâneas onde sofisticados equipamentos de eixo horizontal (“horizontal-boring equipment”) podem ser necessários. A Fig. 23 fornece algumas comparações de custos de diferentes métodos.

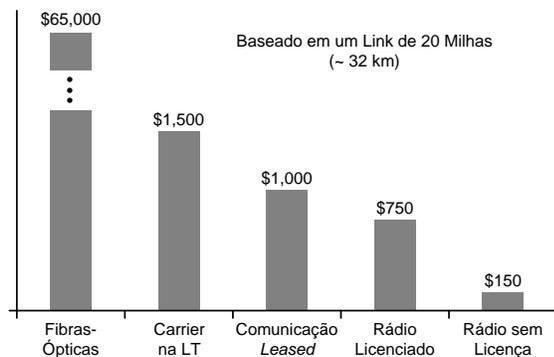


Fig. 23. Comparações de Custos Por Milha para Comunicação

Se dois terminais da linha estiverem afastados por uma distância de várias milhas, o custo da fibra óptica pode ser alto, especialmente se o terreno for difícil. O Sistema Carrier de Linhas de Transmissão (“Power Line Carrier” – PLC) é atrativo pois não há necessidade de instalação de novas linhas. O custo dos equipamentos de conexão é elevado e aumenta ainda mais com o nível de tensão da linha de transmissão. Num caso de uma linha de 69 kV, os equipamentos do PLC custaram aproximadamente \$400,000 (quatrocentos mil dólares). A comunicação contratada (“leased”) inclui pagamentos mensais com aumento gradual ao longo do tempo de vida útil das instalações da concessionária de energia elétrica. Esses conflitos de escolha tornam o rádio atrativo uma vez que permite obter comunicação rápida, sem qualquer

tipo de fiação, entre os terminais da linha. A velocidade das ondas do rádio no ar está próxima da velocidade da luz; logo, quaisquer atrasos são devidos ao rádio e dispositivos eletrônicos da proteção de cada extremidade.

Uma concessionária pode escolher entre rádios licenciados e não-licenciados. Os rádios licenciados requerem tempos de planejamento maiores, pois eles não podem ser colocados em serviço até que o processo de licenciamento esteja concluído. Os custos de licenciamento e coordenação do espectro são todos fatores de complicação. De forma contrária, os rádios não-licenciados podem ser colocados em serviço imediatamente. O uso de antenas altamente direcionais e tecnologia “spread-spectrum” limita os efeitos da interferência. Na verdade, nas bandas ISM os rádios são solicitados a tolerar a interferência gerada por outras fontes. Em todos os casos, o uso do rádio tem que ser acompanhado de um projeto adequado do link do rádio, incluindo os estudos do caminho, medição do piso de ruído, localização e seleção da antena. Existem alguns casos onde os rádios não são a solução apropriada.

Os benefícios da utilização de rádios com bandas ISM podem ser resumidos da seguinte forma:

- Facilidade para entrar em operação (sem custos de licença ou atrasos).
- Interferência reduzida (devido à tecnologia).
- Interface com o ar otimizada para as aplicações de proteção.

VII. CONCLUSÃO

As concessionárias de energia elétrica podem economizar nos custos e melhorar a confiabilidade do sistema usando comunicações via rádio nos esquemas de proteção elétrica. A flexibilidade do rádio e o tempo curto de planejamento associados aos rádios ISM são bastante adequados a diferentes partes do sistema de fornecimento de energia elétrica, incluindo as aplicações de transmissão, distribuição e a geração distribuída emergente. Usando as ferramentas descritas neste artigo, os engenheiros de proteção e comunicação podem implementar sistemas baseados nos rádios com a confiabilidade requerida para os sistemas de proteção e controle. A economia do rádio é particularmente interessante para os sistemas onde o capital de investimento é mais valioso, tais como nos sistemas elétricos rurais, economias emergentes e localizações com terrenos difíceis.

VIII. REFERÊNCIAS

- [1] J. Zyren and A. Petrick, “Tutorial on Basic Link Budget Analysis,” June 1998. Available: <http://www.sss-mag.com/pdf/an9804.pdf>.
- [2] “Overview of Propagation Theory,” adapted from L. E. Miller, *Propagation Model Sensitivity Study*, J. S. Lee Associates, Inc. Contract Report, July 1992. Available: http://w3.antd.nist.gov/wctg/manet/propthy_r1.pdf.
- [3] Maxim Integrated Products, “An Introduction to Spread-Spectrum Communications,” February 2003. Available: <http://www.maxim-integrated.com/an1890>.
- [4] R. C. Dixon, *Spread Spectrum Systems with Commercial Applications*, 3rd Edition, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1994.

- [5] IEEE/PSRC Working Group H2, "Using Spread Spectrum Rádio Communication for Power System Protection Relaying Applications," A Report to the IEEE Power System Relaying Committee, July 2005.
- [6] *Teleprotection equipment of power systems – Performance and testing – Part 1: Command systems, Section 2 Characteristics of command type teleprotection systems*, IEC 60834-1, 1999.

IX. BIOGRAFIAS

Shankar V. Achanta recebeu seu MS em engenharia elétrica da Arizona State University em 2002. Ele ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. (SEL) em 2002 como engenheiro de hardware desenvolvendo dispositivos de eletrônica de potência para comunicação, circuitos de aquisição de dados e fontes de alimentação chaveadas. Shankar recebeu uma patente para um gerador de código de tempo com auto-calibração durante sua permanência na SEL. Atualmente, ele ocupa a posição de gerente de desenvolvimento do grupo de comunicação e precisão de tempo da SEL.

Brian MacLeod tem uma longa e variada experiência nas áreas de desenvolvimento de produtos e marketing técnico nos Estados Unidos e Grã-Bretanha. Ele é membro da IEEE Communications Society, da IEEE Computer Society e da IEEE Standards Association. Foi membro votante do Grupo de Trabalho IEEE 802.3 (Ethernet networking) por mais de dez anos. Antes de ingressar na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., foi consultor durante vários anos e membro de destaque no grupo de gerenciamento da Packet Engines (a pioneira da tecnologia Gigabit Ethernet). No início de sua carreira, Brian trabalhou para importantes empresas, incluindo a NCR Corporation, EMI Electronics e Veeder-Root Ltd. Ele tem um diploma em engenharia elétrica e eletrônica da Glasgow College of Technology, Escócia.

Eric Sagen recebeu seu BS em engenharia elétrica da Washington State University em 1997. Ele ingressou na General Electric na Pennsylvania como engenheiro de produtos. Em 1999, ele foi contratado pela Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. como engenheiro de produtos de distribuição. Logo após, foi promovido para engenheiro líder de produtos de distribuição. Eric foi transferido para o grupo de comunicação e precisão de tempo em 2006 e é atualmente o engenheiro de produtos líder. Ele é certificado em Washington como *Engineer in Training* (EIT).

Henry Loehner recebeu seu BS em engenharia eletrônica da Cal Poly San Luis Obispo em 1983. Ele trabalhou na Hewlett Packard e Agilent Technologies por 25 anos como engenheiro de projetos de radiofrequência e gerente de projetos de pesquisa e desenvolvimento, desenvolvendo equipamentos de testes e medição para a indústria de telefones celulares. Enquanto trabalhava na Hewlett Packard, Henry recebeu uma patente para um projeto de atenuador eletrônico progressivo. Ele ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. em 2010 e está atualmente trabalhando como engenheiro líder de projetos de radiofrequência.