

**UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO  
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO  
PROJETO DE FINAL DE CURSO**

**CÁLCULO DE DESEMPENHO DO  
ENLACE DE ONDA PORTADORA EM  
SISTEMAS DE TELEPROTEÇÃO  
OPLAT**

por

**KARINNE KARLA SILVESTRE**

**Recife, Novembro de 2010**

**UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO  
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CÁLCULO DE DESEMPENHO DO ENLACE DE ONDA  
PORTADORA EM SISTEMAS DE TELEPROTEÇÃO OPLAT**

por

**KARINNE KARLA SILVESTRE**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Elétrica – modalidade Eletrônica da Universidade de Pernambuco, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheira Eletrônica.

**ORIENTADOR: REGINALDO PEREIRA LEAL, M.Sc.**

Recife, Novembro de 2010.

© Karinne Karla Silvestre, 2010.

Resumo da Monografia apresentada ao curso de Engenharia Elétrica da  
Escola Politécnica de Pernambuco.

# **CÁLCULO DE DESEMPENHO DO ENLACE DE ONDA PORTADORA EM SISTEMAS DE TELEPROTEÇÃO OPLAT**

**KARINNE KARLA SILVESTRE**

11 / 2010

Orientador: Reginaldo Pereira Leal, Me.

Área de Concentração: Sistema de Onda Portadora.

Palavras-chave: **Portadora, Teleproteção, OPLAT.**

Número de Páginas: 59.

O presente trabalho apresenta uma breve descrição do sistema de comunicação de Ondas Portadoras em Linhas de Alta Tensão (OPLAT), bem como as características principais dos equipamentos básicos e os parâmetros utilizados para o cálculo do desempenho de um sistema OPLAT. Destaca-se as principais características dessa solução, as vantagens e desvantagens e as considerações que devem ser consideradas durante o cálculo de desempenho dos enlaces, tais como a atenuação da linha e as condições do tempo. Serão apresentados os procedimentos que devem ser seguidos para o cálculo da potência de recepção e da relação sinal-ruído na recepção do sistema de ondas portadoras em linhas de alta tensão. Finalizando o trabalho, será realizada uma comparação entre os resultados obtidos através dos cálculos matemáticos para as condições climáticas favoráveis, como baixa umidade, e para condições de tempo adversas, tais como geada, chuva ou alta umidade. Os resultados mostraram que a utilização de ondas portadoras em linhas de alta tensão para a transmissão de sinais de teleproteção entre subestações é uma solução eficiente. Visto que o sistema OPLAT apresenta resultados satisfatórios no que se refere ao desempenho, garantindo a confiabilidade que o sistema elétrico de potência necessita.

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 2.1: Diagrama dos principais componentes de um canal de comunicação OPLAT. _____	14
Figura 2.2: TPC - Transformador de Potencial Capacitivo. _____	17
Figura 2.3: Combinação do capacitor de acoplamento com a bobina de drenagem. _____	17
Figura 2.4: Circuito LC série. _____	19
Figura 2.5: Curva característica do filtro LC série. _____	20
Figura 2.6: Bobina de bloqueio e Capacitor de acoplamento. _____	21
Figura 2.7: Circuito LC paralelo. _____	22
Figura 2.8: Curva característica do filtro LC paralelo. _____	23
Figura 2.9: Elementos do sistema de comunicação. _____	24
Figura 2.10: (a) Sinal modulante (informação) (b) Forma de onda da portadora (c) Sinal modulado em DSB-SC. _____	28
Figura 2.11: Curvas de atenuação típicas para linhas aéreas operando em condições de tempo bom. _____	31
Figura 2.12: Níveis médios de ruído típicos para linhas de 230kV. _____	34
Figura 2.13: Transmissão do sinal de alta tensão e do sinal de comunicação da teleproteção. _____	39
Figura 2.14: Esquema do acoplamento fase-terra. _____	41
Figura 2.15: Esquema do acoplamento fase-fase. _____	42
Figura 2.16: Esquema do acoplamento trifásico. _____	43
Figura 3.1: Diagrama dos principais componentes de um canal de comunicação OPLAT. _____	48
Figura 3.2: Curvas de atenuação típicas para linhas aéreas operando em condições de tempo bom. _____	49
Figura 3.3: Níveis médios de ruído típicos para linhas de 230kV. _____	51
Figura 4.1: Nível de recepção do enlace OPLAT para tempo ruim. _____	56
Figura 4.2: Relação sinal-ruído do enlace OPLAT para tempo ruim. _____	57

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 2.1: Valores típicos de perda em cabo coaxial de 50Ω. _____	16
Tabela 2.2: Fatores de correção de atenuação em função dos arranjos de acoplamento. _____	32
Tabela 2.3: Fatores de correção de atenuação em função do número de transposições. _____	32
Tabela 2.4: Fatores de correção do ruído para diferentes níveis de tensão. _____	35
Tabela 2.5: Valores típicos de impedância característica de linhas de transmissão aéreas. _____	37

## LISTA DE ABREVIATURAS / SIGLAS

---

Termo		Descrição
AM	<i>Amplitude Modulation</i>	Modulação em Amplitude
cw	<i>Continuous Wave</i>	Onda contínua
DSB-SC	<i>Double Side Band with Supressed Carrier</i>	Banda lateral dupla com portadora suprimida
LT		Linha de Transmissão
OPLAT		Ondas Portadoras em Linhas de Alta Tensão
PAM	<i>Pulse Amplitude Modulation</i>	Modulação por amplitude de pulso
PLC	<i>Power Line Communications</i>	Comunicação em linha de potência
PPM	<i>Pulse Position Modulation</i>	Modulação por posição de pulso
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>	Modulação por largura de pulso
SNR	<i>Signal to noise ratio</i>	Relação Sinal-Ruído
TPC		Transformador de Potencial Capacitivo

## LISTA DE SÍMBOLOS

---

Simbologia	Descrição
$A_{Rx \text{ Tempo bom}}$	Atenuação do sinal antes da sua chegada ao receptor em tempo bom
$A_{Rx \text{ Tempo ruim}}$	Atenuação do sinal antes da sua chegada ao receptor em tempo ruim
$A_S$	Atenuação do sistema
$BW$	Largura de banda
$C$	Capacitância
$C_a$	Correção de acoplamento
$D$	Distância entre condutores
$G$	Condutância
$I$	Corrente elétrica
$j$	Número imaginário
$L$	Indutância
$P_{acBB_{Rx}}$	Perda por acoplamento da bobina de bloqueio no receptor
$P_{acBB_{Tx}}$	Perda por acoplamento da bobina de bloqueio no transmissor
$P_{acCS_{Rx}}$	Perda por acoplamento da caixa de sintonia no receptor
$P_{acCS_{Tx}}$	Perda por acoplamento da caixa de sintonia no transmissor
$P_{acTPC_{Rx}}$	Perda por acoplamento do transformador de potencial capacitivo no receptor
$P_{acTPC_{Tx}}$	Perda por acoplamento do transformador de potencial capacitivo no transmissor
$P_{LT}$	Perda na linha de transmissão
$P_{LT_{TR}}$	Perda na linha de transmissão para tempo ruim
$P_{Rx}$	Potência de recepção
$P_{Rx \text{ Tempo bom}}$	Nível do sinal antes da sua chegada ao receptor para tempo bom
$P_{Rx \text{ Tempo ruim}}$	Nível do sinal antes da sua chegada ao receptor para tempo ruim
$P_{Transp}$	Perda por transposição

$P_{Tx}$	Potência de transmissão
$r$	Raio do condutor
$R$	Resistência do condutor
$Ruido_{Tempo\ bom}$	Nível de ruído para tempo bom
$Ruido_{Tempo\ ruim}$	Nível de ruído para tempo ruim
$R_x$	Receptor
$SNR_{Tempo\ bom}$	Relação sinal-ruído para tempo bom
$SNR_{Tempo\ ruim}$	Relação sinal-ruído para tempo ruim
$t$	Tempo
$T_x$	Transmissor
$V$	Tensão
$w_c$	Frequência angular da portadora
$w_{ressonante}$	Frequência ressonante
$Z_0$	Impedância característica da linha de transmissão
$X_C$	Reatância capacitiva
$X_L$	Reatância indutiva
$Z_{eq}$	Impedância equivalente
$\emptyset_{DSB-SC}$	Sinal modulado em DSB-SC



# SUMÁRIO

---

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO .....	11
1.1. OBJETIVOS DO TRABALHO.....	11
1.2. METODOLOGIA UTILIZADA .....	12
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	12
CAPÍTULO 2. REFERÊNCIAL TEÓRICO .....	13
2.1. COMPONENTES DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO OPLAT .....	13
2.1.1. Equipamentos terminais de transmissão e recepção.....	15
2.1.2. Cabo coaxial .....	15
2.1.3. Capacitor de acoplamento .....	16
2.1.4. Unidade de sintonia .....	18
2.1.5. Bobina de bloqueio .....	21
2.2. SISTEMA DE COMUNICAÇÃO.....	23
2.2.1. Elementos de um sistema de comunicação.....	24
2.2.2. Modos de operação de um canal de transmissão.....	25
2.3. MODULAÇÃO .....	26
2.3.1. Modulação DSB-SC.....	26
2.3.2. Demodulação DSB-SC .....	29
2.4. CARACTERÍSTICAS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	29
2.4.1. Atenuação.....	30
2.4.2. Distorção.....	32
2.4.3. Interferência.....	33
2.4.4. Ruído .....	33
2.4.5. Impedância característica .....	35

2.5. SISTEMA DE TELEPROTEÇÃO ATRAVÉS DE ONDAS PORTADORAS EM LINHAS DE ALTA TENSÃO .....	37
2.5.1. Esquemas de proteção .....	39
2.5.2. Configurações de acoplamento .....	40
CAPÍTULO 3. CÁLCULO DO DESEMPENHO DOS SINAIS DE UM SISTEMA DE TELEPROTEÇÃO OPLAT .....	45
3.1. DADOS TÉCNICOS COMERCIAIS DOS EQUIPAMENTOS .....	45
3.2. CÁLCULO DO NÍVEL DE RECEPÇÃO .....	47
3.3. RESULTADO DOS CÁLCULOS DO NÍVEL DE RECEPÇÃO .....	50
3.4. CÁLCULO DO RUÍDO E DA RELAÇÃO SINAL-RUÍDO .....	51
3.5. RESULTADO DO CÁLCULO DA RELAÇÃO SINAL-RUÍDO .....	52
CAPÍTULO 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	54
4.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS PARA CONDIÇÃO DE TEMPO BOM.....	54
4.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS PARA CONDIÇÃO DE TEMPO RUIM.....	54
CAPÍTULO 5. CONCLUSÃO .....	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	59

# **CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO**

---

A utilização de ondas portadoras em linhas de transmissão teve início na década de 1920 [1]. As linhas de alta tensão, além da transmissão da energia elétrica, transmitem vários tipos de sinais comunicação, como voz, dados e sinais de teleproteção, de controle e de medição. Esses sinais de comunicação são transmitidos juntamente com a energia elétrica, sem que haja interferência mútua, para prover as necessidades de comunicações internas das concessionárias de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Diante dessa situação, empresas de telecomunicações buscam fazer parcerias com concessionárias de energia elétrica com o objetivo de também utilizar as linhas de alta tensão para transmissão de seus sinais [1].

Os sinais de comunicação de Ondas Portadoras em Linhas de Alta Tensão (OPLAT) permitem o monitoramento constante e, conseqüentemente, um melhor controle da própria linha de transmissão. Essa solução também permite que as subestações estejam interligadas entre si, formando uma grande rede de comunicação, viabilizando a operação do sistema de forma remota [1].

## **1.1. OBJETIVOS DO TRABALHO**

O trabalho tem por objetivo analisar o nível de recepção do sistema de ondas portadoras em linhas de alta tensão, através do cálculo da potência de recepção e da relação sinal-ruído e realizar uma comparação entre os resultados encontrados para a condição de tempo ruim e de tempo bom.

Será realizada uma revisão bibliográfica com o objetivo de aplicar os conceitos e teorias adquiridas durante o curso, bem como familiarizar-se com o Sistema de Teleproteção OPLAT frequentemente utilizado por concessionárias de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

## **1.2. METODOLOGIA UTILIZADA**

Para o desenvolvimento do trabalho foi realizada uma ampla pesquisa bibliográfica sobre os itens pertencentes ao assunto em apostilas, livros, normas, projetos e artigos, a fim de reunir informações relevantes ao tema. Depois de selecionado os conteúdos relevantes, foram apresentadas as descrições das principais características de um sistema de ondas portadoras em linhas de alta tensão, bem como das principais características das linhas de transmissão que atuam sobre o desempenho dos sinais de teleproteção.

Após a descrição do sistema procurou-se mostrar as equações necessárias para realização do cálculo do desempenho dos sinais de onda portadora e os fatores que interferem nas perdas desses sinais em linhas de transmissão. Em seguida foi apresentado um exemplo de cálculo de desempenho com o objetivo de comparar os resultados numéricos encontrados para duas condições de tempo. Os dados necessários para o cálculo foram obtidos a partir de um projeto para implantação de um sistema OPLAT associado à linha de transmissão Ibicoara – Brumado.

## **1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. No capítulo 2 estão reunidos todos os conceitos necessários ao entendimento do trabalho, apresentando informações sobre o Sistema de Teleproteção OPLAT e seus principais componentes e sobre as características das linhas de transmissão que influenciam no desempenho do sistema. Ainda no mesmo capítulo são apresentados os conceitos básicos de um sistema de comunicação assim como das técnicas de modulação e de demodulação.

O capítulo 3 descreve o roteiro para o cálculo da potência de recepção e da relação sinal-ruído de um sistema de onda portadora, mostrando as equações e considerações que devem ser feitas para o projeto. Já no capítulo 4, os resultados para tempo bom e tempo ruim, obtidos através dos cálculos, são analisados e comparados. No capítulo 5 é apresentada a conclusão do trabalho.

## **CAPÍTULO 2. REFERÊNCIAL TEÓRICO**

---

Neste capítulo estão reunidos todos os conceitos necessários ao entendimento do trabalho, apresentando, primeiramente, informações sobre o Sistema de Comunicação OPLAT e seus principais componentes. Em seguida são apresentados os conceitos básicos de um sistema de comunicação assim como das técnicas de modulação e de demodulação. Será feita uma descrição das principais características das linhas de transmissão que influenciam no desempenho do sistema em questão. E, por fim, será feita uma breve descrição do sistema de Teleproteção OPLAT.

### **2.1. COMPONENTES DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO OPLAT**

Os fatores mais importantes, do ponto de vista da segurança, a serem considerados quando se deseja conectar equipamentos de comunicação a uma rede de energia elétrica devem ser: isolamento, proteção contra descargas atmosféricas e efeitos de fenômenos transitórios. Pois, os equipamentos destinados à comunicação estão sujeitos a arcos elétricos, tão comum de ocorrer em altas voltagens, a faiscamentos e a outros fenômenos que podem provocar efeitos danosos.

Do ponto de vista do desempenho, o caminho construído para a transmissão do sinal de comunicação deve ser suficientemente eficiente para garantir a qualidade de serviço. Deve haver um percurso adequado à propagação da frequência portadora, evitando perdas indevidas nos sinais de alta frequência, e ao mesmo tempo, reduzir as influências causadas pelos equipamentos existentes na subestação. Torna-se necessário, portanto, a utilização de alguns equipamentos destinados a permitir o acoplamento dos transceptores e isolamento de alta tensão, além de garantir o casamento de impedância.

Nesse contexto, são utilizados para a conexão à linha de alta tensão, além do próprio equipamento de onda portadora (normalmente denominado de *Carrier*),

outros três dispositivos: capacitor de acoplamento, caixa de sintonia e bobina de bloqueio. Esses equipamentos têm, entre outras funções, a finalidade de manter o sinal de onda portadora passando através da linha de transmissão, impedindo que o sinal de teleproteção chegue aos equipamentos da subestação. Ao mesmo tempo, esses dispositivos impedem que a energia proveniente da subestação alcance o equipamento *Carrier*.

O esquema da figura 2.1 mostra os elementos básicos de um canal de comunicação por onda portadora em linha de transmissão.

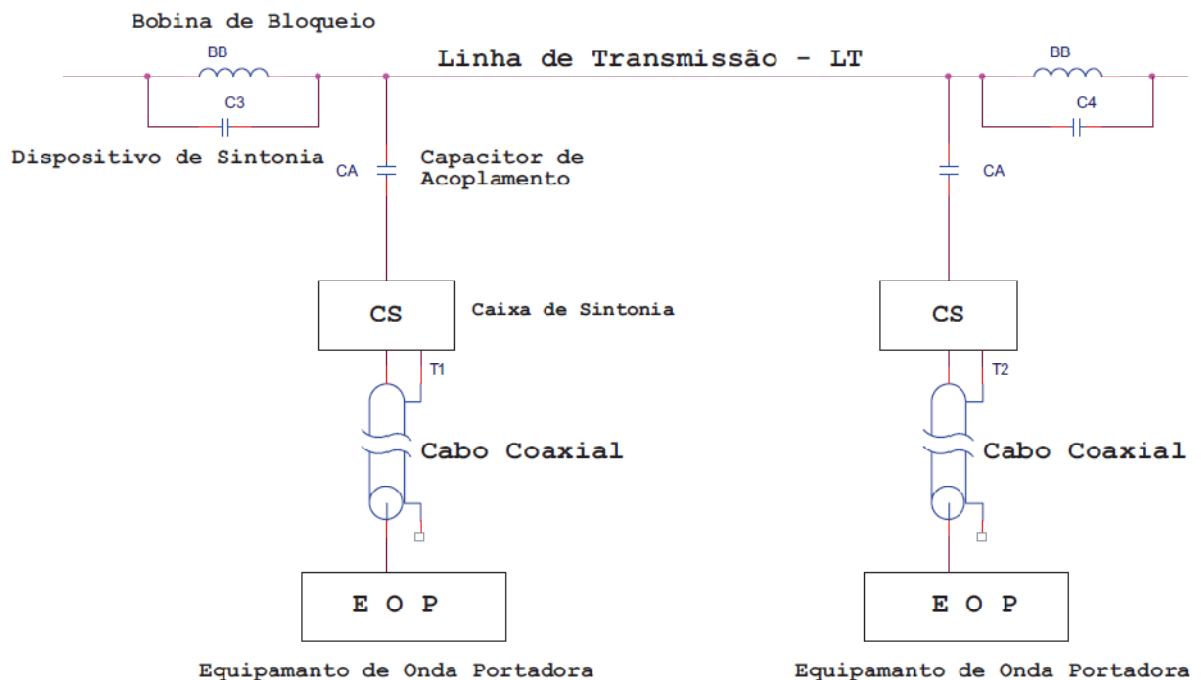


Figura 2.1: Diagrama dos principais componentes de um canal de comunicação OPLAT [1].

O sinal de onda portadora, gerado pelo Equipamento de Onda Portadora em uma subestação, passa pela Caixa de Sintonia e pelo Capacitor de Acoplamento e percorre toda a Linha de Transmissão até atingir a outra subestação, onde passa novamente pelo Capacitor de Acoplamento e pela Caixa de Sintonia até atingir o Equipamento Carrier.

As funções e particularidades dos componentes presentes na figura 2.1 são apresentadas a seguir.

### **2.1.1. Equipamentos terminais de transmissão e recepção**

Os transmissores e receptores de onda portadora são normalmente montados em um bastidor na sala de controle da subestação. Esses equipamentos devem ser ligados as unidades de sintonia que ficam localizadas no pátio da subestação, junto aos capacitores de acoplamento, portanto, há uma longa distancia a ser vencida. Isso obriga que a conexão entre transmissores/receptores e unidades de sintonia seja feita por meio de cabos coaxiais providos de blindagem. Esses minimizam a interferência sobre o sinal da portadora causada por ruídos eletromagnéticos, tais como o efeito corona, presentes no ambiente da subestação.

O sistema a ser analisado nas próximas seções utiliza um equipamento de fabricação Siemens, modelo PowerLink para a transmissão de sinais de Teleproteção em conjunto com sinais de voz e dados. O equipamento PowerLink fornece um canal bidirecional (transmissão/recepção) de dados de teleproteção, com modulação em amplitude, utilizando a técnica DSB-SC, descrita na próxima seção.

### **2.1.2. Cabo coaxial**

Cabos coaxiais são usados para conectar os equipamentos *Carrier*, localizados na sala de controle da subestação, às unidades de sintonia, instaladas no pátio da subestação. São também utilizados para, quando é necessário, realizar a interconexão entre unidades de sintonia separadas por longas distâncias, para garantir conexões de baixa impedância, para conseguir uma baixa perda na conexão.

A malha de cobre deve ser aterrada apenas no terminal de transmissão/recepção, ou em apenas uma terminação de uma conexão entre unidades de sintonia. Isto é feito para evitar transferências de potencial perigosas durante eventos de falhas [3].

A atenuação do cabo coaxial depende do comprimento do mesmo e da frequência utilizada. A seguir é apresentada a tabela 2.1, típica de perda (dB/Km) em um cabo coaxial de 50 Ohms, de acordo com a frequência de operação.

Tabela 2.1: Valores típicos de perda em cabo coaxial de 50Ω [3].

Frequência [KHZ]	Perdas [dB/Km]
30	1,25
50	1,44
100	1,80
150	2,17
200	2,53
300	2,95

### 2.1.3. Capacitor de acoplamento

O capacitor de acoplamento apresenta uma baixa impedância à frequência da portadora e bloqueia a corrente à frequência de 60Hz oferecendo a ela um caminho de alta impedância. Ele é usado como parte do circuito de sintonia, em conjunto com a unidade de sintonia, estando ligado diretamente à linha de transmissão, evitando influências da frequência da rede de energia nos equipamentos *Carrier*.

Embora sejam fabricados capacitores de acoplamento dedicados exclusivamente a este objetivo, normalmente é utilizado o Transformador de Potencial Capacitivo (TPC). O TPC também tem com função fornecer a alimentação para a fonte de tensão dos sistemas auxiliares da subestação (125Vcc/250Vcc), para operar relés de proteção, lâmpadas indicadoras de alarmes, etc. [3]. Valores característicos da capacitância nominal do TPC encontram-se entre 2000pF e 20000pF [1].

O TPC é formado por um invólucro de porcelana no interior do qual se alojam vários capacitores conectados em série, com uma extremidade na parte superior e outra na base. O topo é conectado a LT e a base à Terra, na base esta contida a conexão para ondas portadoras, sistemas de medição e proteção [3]. A figura 2.2 é um TPC típico.





Figura 2.2: TPC - Transformador de Potencial Capacitivo.

Porém, o capacitor de acoplamento só pode desempenhar bem a sua função de oferecer um caminho de baixa impedância à frequência da portadora quando utilizado em conjunto com a **bobina de drenagem**, como mostra a figura 2.3.

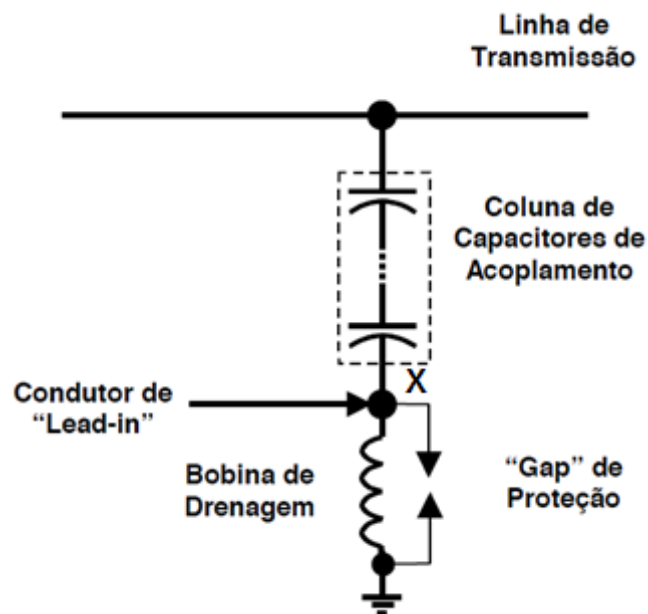


Figura 2.3: Combinação do capacitor de acoplamento com a bobina de drenagem [3].

Para que o potencial no ponto X seja baixo, é necessário que haja um caminho para a terra. Porém, para que o sinal de onda portadora não circule à terra é ligada a base do capacitor de acoplamento uma bobina de drenagem, projetada para ter uma indutância que exibirá uma baixa impedância á frequência industrial e uma alta impedância a frequência da portadora.

Para evitar que eventuais sobretensões, durante transitórios da linha de transmissão, danifiquem os equipamentos existentes é conectado em paralelo com a bobina de drenagem uma unidade protetora. Tal unidade deve consistir de uma chave de aterramento e de um “gap” de proteção, cujo objetivo é evitar que grandes quantidades de energia em altas frequências atinjam a caixa de sintonia, já que a bobina de drenagem oferece alta impedância a essas frequências. A chave de aterramento é usada para proteção de pessoal durante testes e manutenção.

O condutor conhecido como *lead-in* é usado para conectar a unidade de sintonia ao capacitor de acoplamento, de acordo com a figura 2.3. Deve-se utilizar, para este fim, um cabo condutor simples isolado. Como este cabo une dois pontos de alta impedância que formam o circuito LC ressonante em série, o seu efeito de capacitância à terra e a corrente de fuga por condutância afetaria o desempenho global de circuito já que o cabo passaria a comportar-se como um capacitor, originando a perda do sinal para a terra. Assim, recomenda-se que seja utilizado um cabo com tensão de isolação alta o suficiente para manter alguma rigidez.

#### **2.1.4. Unidade de sintonia**

A unidade de sintonia, ou caixa de sintonia, tem por finalidade evitar interferências e ruídos, além de proteger o terminal de *Carrier* das sobretensões e sobrecorrentes provenientes de alta tensão. Também tem como função permitir a realização do casamento de impedância entre o *Carrier* e a linha de alta tensão, resultando assim em uma melhor eficiência na transmissão do sinal.

Os equipamentos terminais de Ondas Portadoras são fabricados de forma que entre os terminais de saída ou de entrada, à linha de transmissão (LT), apresentam uma impedância de  $50\Omega$  ou de  $75\Omega$ . Por isso a necessidade do casamento de impedância com a LT através do sintonizador de linha (unidade de

sintonia) para linhas de transmissão de 500kV e 230kV, 250Ω e 400Ω, respectivamente.

A combinação da caixa de sintonia com o capacitor de acoplamento fornece um caminho de baixa impedância para o sinal da portadora pela formação de um circuito ressonante série, sintonizado na frequência da portadora. O indutor da caixa de sintonia ajusta-se de tal forma, que a sua reatância indutiva ( $X_L$ ) é igual à reatância capacitiva ( $X_C$ ) para a frequência central da faixa de passagem da portadora. Desta forma, se obtém um circuito LC ressonante em série, apresentado na figura 2.4, de uma impedância alta para a frequência de 60Hz.

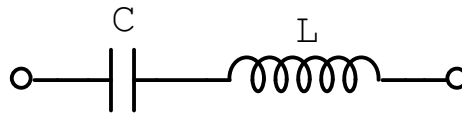


Figura 2.4: Circuito LC série.

O circuito LC série estará em ressonância quando  $X_L = X_C$ , matematicamente temos:

$$X_L = j\omega L \quad (2.1)$$

$$X_C = 1/j\omega C \quad (2.2)$$

Onde:

L = valor da indutância

C = valor da capacitância

A impedância equivalente  $X_L$  série  $X_C$  é:

$$Z_{eq} = X_L + X_C \quad (2.3)$$

$$Z_{eq} = \omega L + \frac{1}{\omega C} \quad (2.4)$$

Analisando a equação 2.4 podemos concluir que:

$$\omega \rightarrow 0 \Rightarrow Z_{eq} = \infty \quad (2.5)$$

$$\omega \rightarrow \infty \Rightarrow Z_{eq} = \infty \quad (2.6)$$

Quando  $\omega \rightarrow 0$  ou  $\omega \rightarrow \infty$  a impedância equivalente é muito alta, o circuito praticamente comporta-se como um circuito aberto. Quando  $X_L = X_C$  a frequência ressonante é dada pela equação 2.7, nesse caso o circuito apresenta uma baixa impedância para a frequência ressonante, como mostrado na figura 2.5.

$$\omega_{ressonante} = \sqrt{1/LC} \quad (2.7)$$

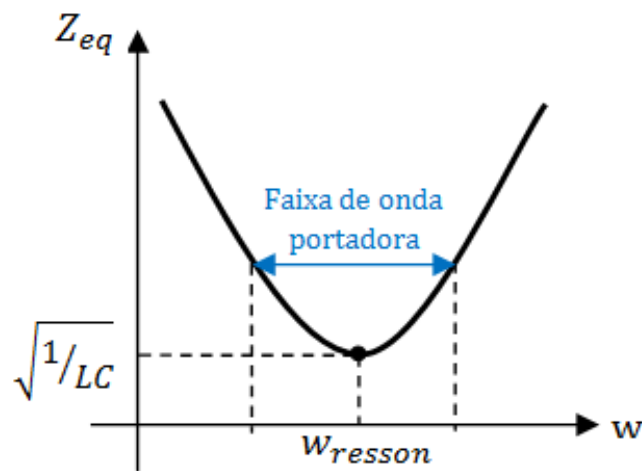


Figura 2.5: Curva característica do filtro LC série.

### 2.1.5. Bobina de bloqueio

As bobinas de bloqueio têm a finalidade de confinar o sinal de onda portadora no interior da linha de transmissão, impedindo que o sinal de teleproteção chegue aos equipamentos da subestação. Elas são localizadas nos terminais da linha a ser protegida, possuindo uma baixa impedância para a frequência industrial e alta impedância para a frequência da onda portadora. A bobina de bloqueio é conectada em série com a linha de transmissão. A figura 2.6 mostra uma bobina de bloqueio ligada ao TPC.



Figura 2.6: Bobina de bloqueio e Capacitor de acoplamento.

Outra importante função da bobina de bloqueio é insensibilizar o sinal da portadora a mudanças na impedância do barramento da subestação, tornando-o mais independente das condições de chaveamento que modificam as configurações operativas do sistema.

O arranjo básico de uma bobina de bloqueio é constituído por um circuito LC paralelo, conforme figura 2.7, que apresenta uma alta impedância ao sinal da portadora. Por isso o circuito é instalado em série com a linha de transmissão, entre a saída do barramento da subestação e o capacitor de acoplamento, forçando o sinal da portadora a se propagar na direção do terminal remoto da linha.

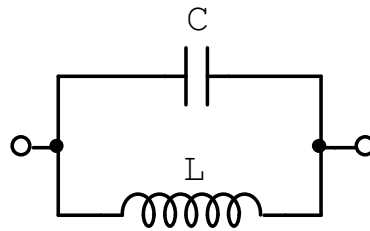


Figura 2.7: Circuito LC paralelo.

Quando numa frequência determinada as reatâncias indutiva e capacitiva são iguais ( $X_L = X_C$ ) diz-se que o circuito está em ressonância ou “sintonizado” nesta frequência chamada **frequência ressonante**.

A impedância equivalente  $X_L // X_C$  é:

$$Z_{eq} = X_L // X_C = \frac{X_L \cdot X_C}{X_L + X_C} \quad (2.8)$$

Substituindo  $X_L$  e  $X_C$  definidos pelas equações 2.1 e 2.2, respectivamente, encontramos:

$$Z_{eq} = \frac{\omega L \cdot \frac{1}{\omega C}}{\omega L + \frac{1}{\omega C}} \quad (2.9)$$

$$Z_{eq} = \frac{\frac{L}{C}}{\omega L + \frac{1}{\omega C}} \quad (2.10)$$

Analisando a equação 2.10, teremos:

$$\omega \rightarrow 0 \Rightarrow Z_{eq} = 0 \quad (2.11)$$

$$\omega \rightarrow \infty \Rightarrow Z_{eq} = 0 \quad (2.12)$$

Quando  $\omega \rightarrow 0$  ou  $\omega \rightarrow \infty$  a impedância equivalente é nula. Quando  $X_L = X_C$  a frequência ressonante é dada pela equação 2.13, nesse caso o circuito apresenta uma alta impedância para a frequência ressonante. Enquanto que para frequências baixas ou altas praticamente não apresenta nenhuma impedância, como mostrado na figura 2.8.

$$\omega_{ressonante} = \sqrt{1/LC} \quad (2.13)$$

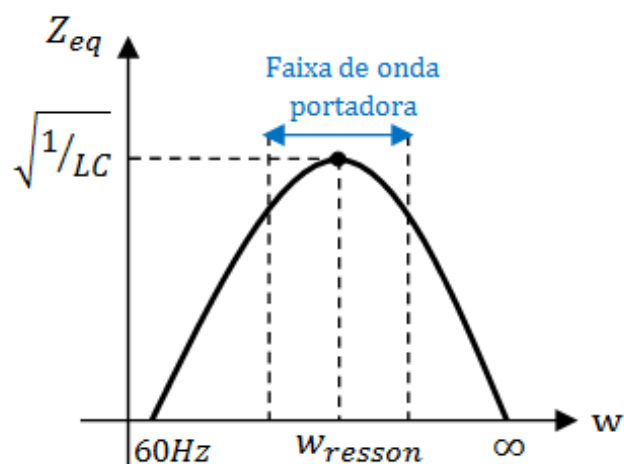


Figura 2.8: Curva característica do filtro LC paralelo.

A bobina de bloqueio (LC em paralelo) e o capacitor de acoplamento junto com caixa de sintonia (LC série) estão sintonizados na faixa de frequência que se deseja transmitir a onda portadora na linha de alta tensão.

Valores típicos da indutância de uma bobina de bloqueio encontram-se na faixa entre 0.1mH a 2mH, com correntes nominais entre 400A a 4000A [3].

## 2.2. SISTEMA DE COMUNICAÇÃO

Comunicação é o processo mediante o qual uma mensagem é enviada por um emissor, passa por meio de um determinado canal, e é entendida por um receptor. O sistema de comunicação é a rede por meio da qual fluem **informações**.

Para que a informação seja transferida através do meio de comunicação é necessário que ela seja representada na forma de um **sinal**. A forma do sinal é determinada de acordo com o canal de comunicação a ser utilizado. No caso de um canal de comunicação analógico a informação será representada na forma de um sinal analógico.

### 2.2.1. Elementos de um sistema de comunicação

Definimos comunicação como o processo pelo qual uma informação é transferida de um ponto, denominado fonte, para outro ponto denominado destino. Há três partes essenciais em um sistema de comunicação elétrica: o transmissor, o canal de transmissão e o receptor, conforme figura 2.9. Cada um desempenha uma função característica.



Figura 2.9: Elementos do sistema de comunicação.

- TRANSMISSOR

A principal função do transmissor é adequar o sinal de entrada ao canal de comunicação desejado ou disponível [6]. Para fins de transmissão efetiva e eficiente, algumas operações de processamento do sinal devem ser efetuadas. A mais comum e importante destas operações é a modulação, que será descrito com detalhes mais adiante.

- CANAL DE TRANSMISSÃO



O meio ou canal de transmissão é a ligação entre o transmissor e o receptor, cobrindo a distância desde a fonte até o destino. O meio pode corresponder a um par de fios, um cabo coaxial, uma linha de alta tensão, uma onda de rádio ou até mesmo um enlace de fibra óptica. Porém independente do tipo, todos os canais de comunicação envolvem perdas ou atenuação do sinal e contaminação por ruído. Além disso, o sinal de comunicação está sujeito a interferências que, por sua vez, provocam mudanças na forma do sinal transmitido.

- RECEPTOR

A função do receptor é extrair o sinal desejado do canal e fornecê-lo ao transdutor de saída. Visto que os sinais recebidos são, quase sempre, muito pequenos, como resultados da atenuação sofrida no meio de transmissão, o receptor deverá possuir vários estágios de amplificação.

Entretanto, a função principal desempenhada pelo receptor é a demodulação (ou detecção), o inverso do processo de modulação do transmissor, que restaura o sinal a uma forma semelhante ao original transmitido.

## **2.2.2. Modos de operação de um canal de transmissão**

Um sistema de comunicação, quanto ao modo de transmissão das informações, pode ser classificado em:

- Simplex – o sistema possui apenas um sentido de transmissão, do transmissor para o receptor, não sendo possível o tráfego na direção oposta (unidirecional);
- Half-duplex - o sistema permite a transmissão do sinal em ambos os sentidos, do transmissor para o receptor e do receptor para o transmissor, porém, uma transmissão de cada vez; e
- Full-duplex - o sistema permite a transmissão em ambos os sentidos simultaneamente (bidirecional).

## 2.3. MODULAÇÃO

Modulação é o tratamento dado ao sinal que se quer transmitir, para melhor adequá-lo ao canal desejado ou disponível, através do uso de uma onda portadora. Basicamente, a modulação é um processo no qual algumas características de uma forma de onda chamada de **portadora** são alteradas de acordo com as características de outra forma de onda, denominado **moduladora**, que possui o sinal a ser transmitido.

É possível identificar dois tipos básicos de modulação de acordo com o tipo de Onda Portadora:

- Quando a portadora é uma senóide, diz-se que a modulação é **cw** (do inglês: *Continuous Wave*). A amplitude, fase ou frequência da portadora varia continuamente em função da informação a ser transmitida. Ex.: AM, PM, FM [4].
- Quando a portadora é um trem de pulsos diz-se que a modulação é **pulsada**. A amplitude, largura ou posição de um pulso da portadora varia em função das amostras da informação a ser transmitida. Ex.: PAM, PWM, PPM [4].

Tendo em vista que o objetivo principal deste trabalho não é curso completo sobre sinais e modulação, iremos apenas exemplificar um tipo de modulação em amplitude, frequentemente utilizada em sistemas OPLAT, fazendo uma breve descrição da Modulação em Amplitude com Portadora Suprimida, designada por DSB-SC.

### 2.3.1. Modulação DSB-SC

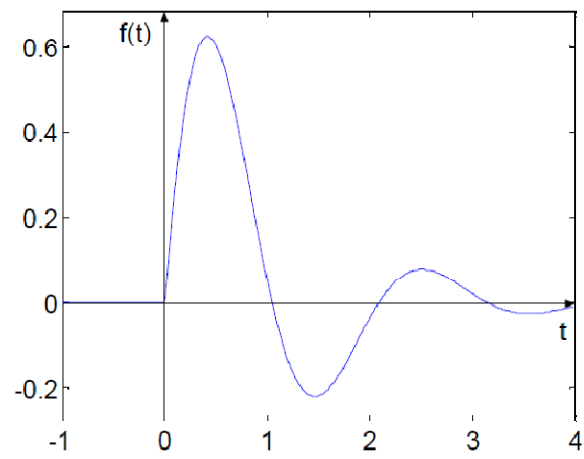
A modulação é designada em amplitude (**AM**, do inglês *Amplitude Modulation*) quando a amplitude da portadora varia proporcional o sinal modulador (a mensagem) [6].

A técnica da modulação DSB-SC consiste em multiplicar a mensagem a ser transmitida pela portadora senoidal de frequência angular  $\omega_c$  igual a frequência desejada, dessa maneira, a forma do sinal modulante é inalterada.

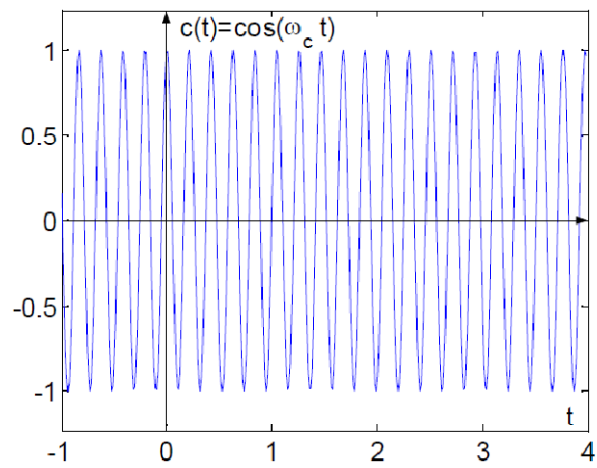
Seja  $f(t)$  o sinal modulante e  $c(t) = \cos(\omega_c t)$  a portadora, definimos o sinal modulado em DSB-SC como:

$$\phi_{DSB-SC}(t) = f(t) \cdot \cos(\omega_c t) \quad (2.14)$$

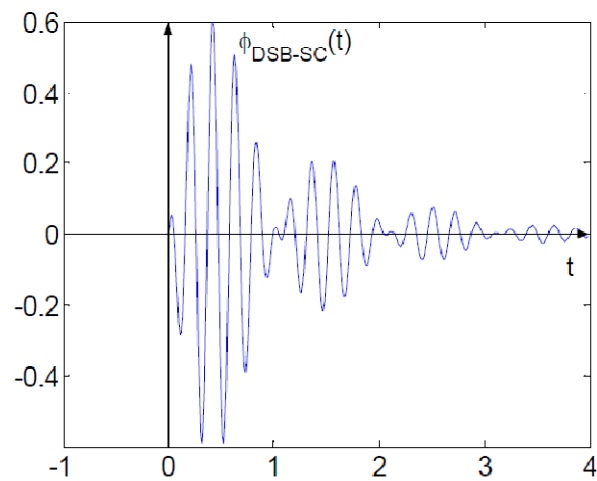
As formas de onda do sinal modulador, da portadora e do sinal modulado (DSB-SC) são apresentadas na figura 2.10.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.10: (a) Sinal modulante (informação) (b) Forma de onda da portadora (c) Sinal modulado em DSB-SC [4].

Independente do tipo de portadora, onda contínua ou pulsada, a modulação deve ser um processo reversível, de modo que a mensagem possa ser recuperada no receptor pela operação complementar chamada demodulação.

### 2.3.2. Demodulação DSB-SC

O processo de demodulação DSB-SC é bastante complexo devido à ausência da portadora, que deve ser restaurado no demodulador. A recuperação o sinal  $f(t)$  a partir do sinal modulado  $\phi_{DSB-SC}(t)$ , no receptor, requer a sua multiplicação por uma senóide de frequência e fase exatamente iguais a da portadora.

No receptor temos:

$$\phi_{DSB-SC}(t) \cdot \cos(\omega_c t) = f(t) \cdot \cos(\omega_c t) \cdot \cos(\omega_c t) \quad (2.15)$$

$$\phi_{DSB-SC}(t) \cdot \cos(\omega_c t) = f(t) \cdot \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \cos(2\omega_c t) \right] \quad (2.16)$$

$$\phi_{DSB-SC}(t) \cdot \cos(\omega_c t) = \frac{1}{2} f(t) + \frac{1}{2} f(t) \cdot \cos(2\omega_c t) \quad (2.17)$$

Para restaurar o sinal original  $f(t)$ , a partir da equação 2.17, basta submeter o sinal obtido a um filtro Passa-Baixas de largura de banda  $\omega_m < W < 2\omega_c - \omega_m$  [4], onde  $\omega_m$  é a frequência do sinal original  $f(t)$ .

Os sistemas com portadora suprimida (DSB-SC) exigem a geração da portadora local no receptor com frequência e fase corretas para a detecção síncrona. Isto torna o circuito receptor complexo e caro [4].

## 2.4. CARACTERÍSTICAS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

Na maioria dos casos as linhas de transmissão que ligam as usinas de geração com subestações de transformação são aéreas. As tensões industriais das

linhas são normalmente compreendidas entre 13.8kV e 500kV, embora existam também linhas de transmissão operando valores mais elevados (750kV).

Ao longo da transmissão de um sinal ocorrem alguns efeitos indesejáveis. Um deles é a atenuação, que reduz a intensidade do sinal. Mais relevantes, entretanto, são a distorção, a interferência e o ruído, que aparecem como alterações na forma do sinal original. Embora estas combinações sejam introduzidas através de todo o sistema, é prática comum e conveniente considerá-las entrando apenas no canal, tratando o transmissor e receptor como ideais [3].

Os parâmetros usados para determinação das características da linha são atenuação, distorção, interferência, ruído e impedância característica. Tais parâmetros serão descritos nas seções seguintes.

#### **2.4.1. Atenuação**

A atenuação é definida como a redução da intensidade da energia ou da potência do sinal. Vários fatores contribuem para as perdas de potência dos sinais de ondas portadoras em linhas de transmissão. As perdas crescem com o aumento da frequência pelo fato de serem basicamente causadas pela capacitância paralela, cuja impedância torna-se menor para frequências mais altas. A figura 2.11 apresenta perdas típicas para linhas de transmissão aéreas em condições de tempo bom, ou seja, condições de tempo favoráveis, baixa umidade.

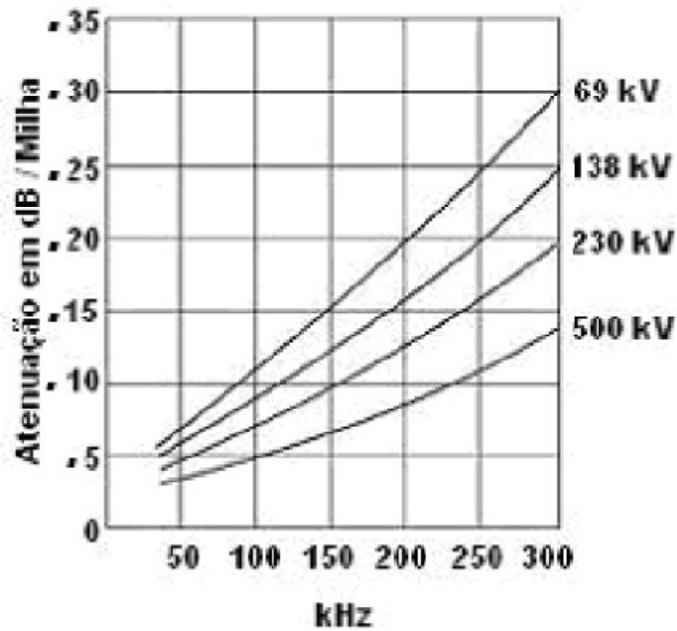


Figura 2.11: Curvas de atenuação típicas para linhas aéreas operando em condições de tempo bom [3].

As condições climáticas adversas sempre aumentam a atenuação. Quando gelo espesso se forma sobre o condutor de fase o efeito pelicular força a corrente a tentar se propagar pelo gelo. A presença de contaminantes sobre os isoladores também aumenta a atenuação, principalmente quando associada à umidade, sendo a pior situação quando se dá sob chuva leve.

Para condições climáticas adversas, quando a linha de transmissão está submetida a geada, a chuva forte ou fraca ou, simplesmente, a alta umidade, os valores apresentados na figura 2.11 devem ser acrescidos de 25% para linhas operando em tensões iguais ou maiores que 230kV e de 50% para tensões abaixo de 230kV [3]. A tabela 2.2 apresenta os fatores de correção em função dos arranjos de acoplamento mais comuns. A tabela 2.3 apresenta um método para aplicar correções aos valores dados na figura 2.11 em função do número de transposições da linha.

Como a atenuação aumenta com a frequência é preferível usar as frequências mais baixas nos enlaces destinados a interligar as maiores distâncias (250 km ou mais), e particularmente para os casos onde as linhas de transmissão apresentem uma grande quantidade de transposições. Empregar as frequências mais baixas em linhas que irão operar em tensão mais elevadas, para melhorar a relação sinal-ruído (SNR).

Tabela 2.2: Fatores de correção de atenuação em função dos arranjos de acoplamento [3].

<b>Tipos de acoplamento</b>	<b>Comprimento &gt; 80 km [dB]</b>
Modo 3	0
Fase-Fase	2
Fase-Terra	
Cabo guarda de Al ou Cu	3
Cabo guarda de aço	6
Inter-circuitos	5

Tabela 2.3: Fatores de correção de atenuação em função do número de transposições [3].

<b>Número de transposições</b>	<b>Comprimento &lt;16 km [dB]</b>	<b>Comprimento &gt;160 km [dB]</b>
1	0	6
2 – 4	0	8
5 ou mais	0	10

### **2.4.2. Distorção**

Também considerada como atenuação variável no tempo, a distorção é uma alteração (modificação da forma original) do sinal, devido a uma resposta imperfeita do sistema ao próprio sinal. Projetos de circuitos ou sistemas convenientes, ou redes de compensação podem reduzir a distorção (equalizadores). Teoricamente, é possível sua compensação perfeita. Na prática, deve ser aceita alguma distorção,



embora dependendo da utilização do sistema de comunicação (voz, dados, imagem, etc.), a distorção deverá ter seus limites de aceitação.

A distorção é inerente ao sinal de informação, só desaparecendo completamente quando este é anulado, diferente do ruído e da interferência, como será apresentado nas seções seguintes.

### **2.4.3. Interferência**

A interferência é contaminação do sinal por outros sinais estranhos (originados de outra fonte) normalmente sintetizados, de forma similar ao sinal desejado. O problema é muito comum em transmissões comerciais, onde dois ou mais sinais podem ser captados ao “mesmo tempo” pelo receptor.

A solução para o problema da interferência é eliminar o sinal interferente ou sua fonte (extinção do sinal). Novamente a solução perfeita é possível na teoria, mas nem sempre é possível na prática.

### **2.4.4. Ruído**

Por ruído, consideramos os sinais elétricos aleatórios ou imprevisíveis que não têm nenhum conteúdo de informação ou sinal útil, provenientes de causas naturais, tanto externos quanto internos ao sistema. Quando estas variações aleatórias são adicionadas a um sinal que contém informação, esta informação pode ser parcialmente mascarada ou totalmente eliminada, dependendo do fator relação sinal-ruído (SNR). A relação sinal-ruído expressa o quanto o nível do sinal é superior ao nível do ruído, por isso quanto maior a SNR maior é a imunidade do sinal com relação ao ruído.

Há dois tipos básicos de ruídos em linhas de transmissão: os contínuos, que estão presentes o tempo todo, e os impulsivos, que aparecem em períodos curtos de tempo. O ruído impulsivo é composto de impulsos de grande amplitude e curta duração, originado pela operação de disjuntores, seccionadores de linha e descargas atmosféricas [3]. Apesar de ser temporário, tem maior importância, por que os picos dos impulsos ficam muito acima do nível de ruído corona.

O ruído errático ou corona, presente durante todo o tempo, é o resultado de uma grande quantidade de descargas ao longo dos condutores da linha devido ao acúmulo de poeiras e fissuras nos isoladores. Aumentam quando as condições dielétricas em torno dos condutores diminuem devido à chuva, umidade, etc. [3].

O ruído é um dos fatores que limita a distância máxima de um enlace por OPLAT, uma vez que o sinal da portadora diminui (é atenuado) com o aumento da distância do enlace, o ruído cresce em relação ao sinal. O sinal da portadora recebido deve ser maior que o ruído, pois o efeito de uma SNR ruim pode provocar uma atuação indevida do sistema de proteção, já que o receptor pode entender um ruído como um comando da própria proteção.

As condições climáticas adversas alteram severamente o ruído nas linhas aéreas. O nível de ruído em clima ruim pode ficar até 30dB acima do ruído observado em tempo bom. A figura 2.12 mostra níveis médios de ruído típicos em condições de clima bom e ruim para linhas de 230kV e uma faixa de frequência de 30 a 300 kHz.

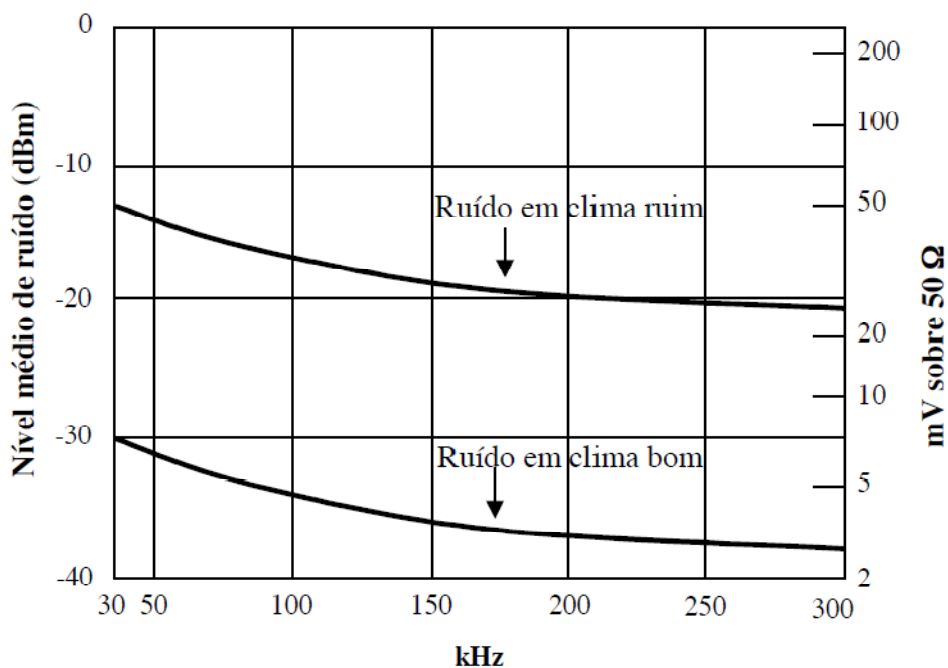


Figura 2.12: Níveis médios de ruído típicos para linhas de 230kV [3].

Podem-se utilizar fatores de correção, de acordo com a tabela 2.4, a fim de determinar os níveis de ruído em outros níveis de tensão. No cálculo da SNR é importante levar em conta a largura de banda do canal.

A fórmula geral para o fator de correção do ruído, em função da largura de banda do canal, é dada pela equação 2.18 [3].

$$dB = 10 \log_{10} \left( \frac{BW}{3000} \right) \quad (2.18)$$

Onde BW é a largura de banda do canal em Hz.

Tabela 2.4: Fatores de correção do ruído para diferentes níveis de tensão [3].

Tensão [KV]	Fator de Correção [dB]
66 - 115	- 8
138 – 161	- 4
230	0
345	+ 2
500	+ 5
765	+ 12

### 2.4.5. Impedância característica

Um dado bastante empregado para especificar um cabo de transmissão de sinais é a sua impedância característica. A falta de simetria e homogeneidade das linhas de transmissão, não permite a determinação precisa dos valores de impedância característica. Os valores de impedância que apresentam uma linha em um determinado ponto variam em função da frequência do sinal. Enquanto que os valores de impedância que apresentam uma linha em vários de seus pontos a uma frequência determinada, variam em função da distância [3].

Nos tratados de linhas de transmissão uniforme de comprimento infinito, em que não há ondas refletidas, a relação entre a tensão e a corrente em qualquer ponto da linha é uma constante  $Z_0$  [3], chamada impedância característica, a qual depende de certos parâmetros conforme equação 2.19.

$$Z_0 = \frac{V^+}{I^+} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (2.19)$$

Onde: V: tensão

I: corrente

R: resistência

G: condutância

L: indutância

C: capacitância

Como na prática as reatâncias são muito maiores que a resistência e a condutância, a equação 2.19 pode ser aproximada por:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.20)$$

Há uma pequena variação da impedância característica com linhas empregadas para diferentes voltagens. Porque tanto o raio do condutor,  $r$ , quanto a distancia entre condutores,  $D$ , cresce com o aumento da tensão de operação da linha, matematicamente, esta variação é proporcional ao logaritmo da relação do espaçamento entre condutores e o raio dos mesmos, de acordo com a equação 2.21 [3]. De maneira genérica, ambas as variáveis ( $D$  e  $r$ ) são elevadas para linha com alta tensão, nesse caso poderão ser obtidos valores menores para  $Z_0$ .

$$Z_0 = 276 \log \frac{D}{r} \quad (2.21)$$

O valor da impedância, segundo a qual os terminais e o equipamento de acoplamento deverão ser conectados deve atender a um mínimo casamento. Para maximizar a transferência de potencia, a unidade de sintonia deve casar a impedância do equipamento de transmissão com a impedância característica da linha.

As linhas de transmissão comerciais são comumente designadas por valores definidos de impedância característica. A tabela 2.5 apresenta o intervalo de valores que poderão ser esperados para diversas espécies de linhas de transmissão.

Tabela 2.5: Valores típicos de impedância característica de linhas de transmissão aéreas [3].

Condutor de linhas de transmissão (cada fase)	Impedância característica [ $\Omega$ ]	
	Fase-terra	Fase-fase
<b>Simple</b>	350-500	650-800
<b>Dois fios</b>	250-400	500-600
<b>Quatro fios</b>	200-350	420-500

Normalmente, as linhas de 230KV e de 500KV têm respectivamente para efeito de cálculo  $400\Omega$  e  $250\Omega$  [3]. As linhas de transmissão para voltagens menores, isto é, 13,8KV, 69KV, etc., apresentam, ordinariamente, condutores de menor diâmetro, o que se estabelecem resistências mais elevadas e maiores valores de atenuação por unidade de comprimento; já as linhas de transmissão destinadas ao intervalo de 300KV à 750KV usualmente empregam condutores múltiplos por fase, ou diâmetros de maior valor, ocorrendo resistências menores para frequências portadoras.

## 2.5. SISTEMA DE TELEPROTEÇÃO ATRAVÉS DE ONDAS PORTADORAS EM LINHAS DE ALTA TENSÃO

Os sistemas de comunicação que utilizam como meio físico as linhas de transmissão de energia, injetando nelas sinais senoidais de frequências muito superiores a industrial são chamados usualmente de PLC, abreviatura da expressão *Power Line Carrier* (do inglês, Portadora em Linha de Potência), não são novidade. Eles vêm sendo utilizados a mais de 100 anos em diversas aplicações.

A convergência de diversos serviços corporativos e operativos, além de potenciais serviços visando negócios em telecomunicações, está se tornando uma realidade dentro das empresas concessionárias de energia elétrica e que novas técnicas e soluções associadas à técnica PLC oferecem os parâmetros de qualidade, confiabilidade e segurança, exigidos por esse segmento [5].

A principal aplicação do PLC em sistemas de transmissão de energia destina-se à Teleproteção. Nesta aplicação um canal é usado para envio de um comando originado por uma dada lógica de proteção num extremo da linha, para que esse sinal possa dar partida a uma lógica de proteção no terminal remoto, normalmente, visando reduzir o tempo de isolamento do trecho de linha defeituoso [2]. Portanto, a teleproteção nada mais é do que equipamentos de telecomunicação, que a proteção do sistema elétrico de potência utiliza, com a finalidade de realizar a abertura instantânea e simultânea de todos os disjuntores da alimentação da linha danificada. Desta forma consegue-se que a deterioração produzida no ponto do defeito seja mínima.

As justificativas de ordem econômica e técnica para a utilização deste tipo de tecnologia incluem:

- Eficiência no uso de recursos de infra-estrutura das linhas de energia pré-existent;
- Melhora na segurança de dados pela independência e disponibilidade contínua do canal de comunicação;
- Transmissão rápida e dedicada de dados e serviço;
- Transmissão integrada de dados, voz e sinais de proteção pelos mesmos equipamentos;
- Possibilidade de transmissão simultânea de informações analógicas e digitais.

Neste sistema, sinal de teleproteção é transmitido por uma onda portadora de alta frequência, na ordem de 30 a 500kHz [3], que se superpõe à corrente elétrica (60Hz) da linha de transmissão. Cada sinal, com sua respectiva frequência, se propaga independentemente como se o outro não existisse, conforme figura 2.13.

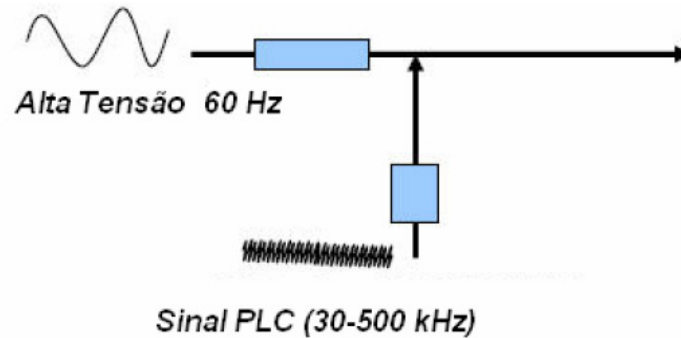


Figura 2.13: Transmissão do sinal de alta tensão e do sinal de comunicação da teleproteção [1].

### 2.5.1. Esquemas de proteção

A determinação e localização rápida de um defeito em uma linha de transmissão permite realizar a abertura instantânea e simultânea de todos os disjuntores da alimentação da linha danificada. Desta forma consegue-se que a deterioração produzida no ponto da falha seja mínima, permitindo o religamento automático dos disjuntores [3]. São utilizados dois tipos básicos de esquemas de proteção com canais de comunicação OPLAT. Ambos têm uma característica comum no referente “a forma de atuação”, pois é a presença ou ausência de um sinal de teleproteção transmitido através do canal de comunicação que define a operação do sistema de proteção.

Se a abertura dos disjuntores é bloqueada pela transmissão do sinal de teleproteção, o esquema se denomina **Esquema de bloqueio**. Quando a presença do sinal de teleproteção é o que determina abertura dos disjuntores, o esquema é denominado **Esquema de disparo ou “trip”**.

Como o sinal que definirá o bloqueio ou a abertura dos disjuntores se propaga pela própria linha de transmissão que se pretende proteger, não existe a completa segurança de que o sinal gerado num terminal alcançará o oposto quando o defeito se apresente na seção de linha a ser percorrida pelo sinal. Por este motivo, a utilização de ondas portadoras em linhas de alta tensão é recomendada para ser usada, preferencialmente, em esquema de bloqueio, pois, nesta condição a linha está intacta para a transmissão de sinal de teleproteção.

O acoplamento dos equipamentos terminais à linha de transmissão pode ser feito a uma, a duas ou a três fases. A escolha entre um tipo ou outro depende de características técnicas e econômicas, conforme discriminadas a seguir.

## **2.5.2. Configurações de acoplamento**

O emprego dos equipamentos destinados ao acoplamento do *Carrier* à linha de potência possibilita diversos arranjos, tendo em vista que a linha de transmissão é um sistema trifásico (A,B,C). Além do que entre duas subestações poderá existir mais de uma LT interligando-as. Existem quatro configurações básicas de acoplamento que são acoplamento fase-terra, fase-fase, inter-circuitos e trifásico. As características desses tipos de acoplamento são descritas a seguir.

- **ACOPLAMENTO FASE-TERRA**

Nesse arranjo os equipamentos terminais são conectados entre uma fase da linha de transmissão e a terra da subestação, conforme figura 2.14. Esse tipo de acoplamento necessita apenas de uma bobina de bloqueio, um capacitor de acoplamento e um grupo de sintonia em cada extremo da linha de transmissão, fazendo com que esse esquema tenha um baixo custo de implantação. No entanto, apresenta altos valores de atenuação e baixa segurança, considerando a probabilidade de ocorrer um curto-circuito para a terra na fase de acoplamento. Principalmente devido às vantagens econômicas, os acoplamentos fase terra podem ser empregados nos locais onde a confiabilidade, na presença das faltas de linha, não é requisito essencial.



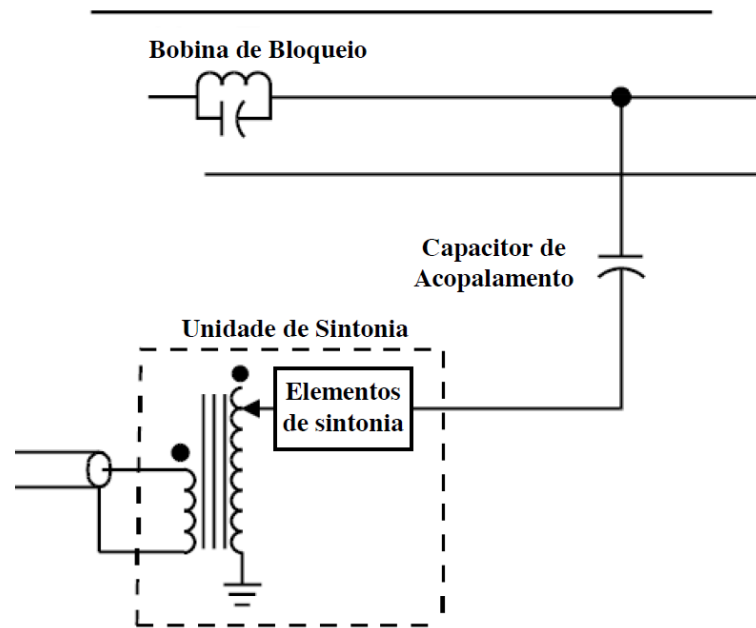


Figura 2.14: Esquema do acoplamento fase-terra [3].

A experiência demonstra que as perdas são menores se o acoplamento é feito no condutor central da linha de transmissão no lugar das laterais, devido ao balanceamento em relação aos outros dois condutores [3].

- **ACOPLAMENTO FASE-FASE**

No acoplamento fase-fase o equipamento terminal é conectado entre dois condutores da linha de transmissão da forma representada na figura 2.15. Neste caso são necessárias duas bobinas de bloqueio, dois capacitores de acoplamento e dois grupos de sintonia, o que praticamente duplica o custo quando comparado ao acoplamento fase-terra. Porém, este tipo de acoplamento proporciona vantagens importantes, incluindo menores atenuações, maior segurança contra perdas de comunicação no sistema OPLAT e menores interferências.

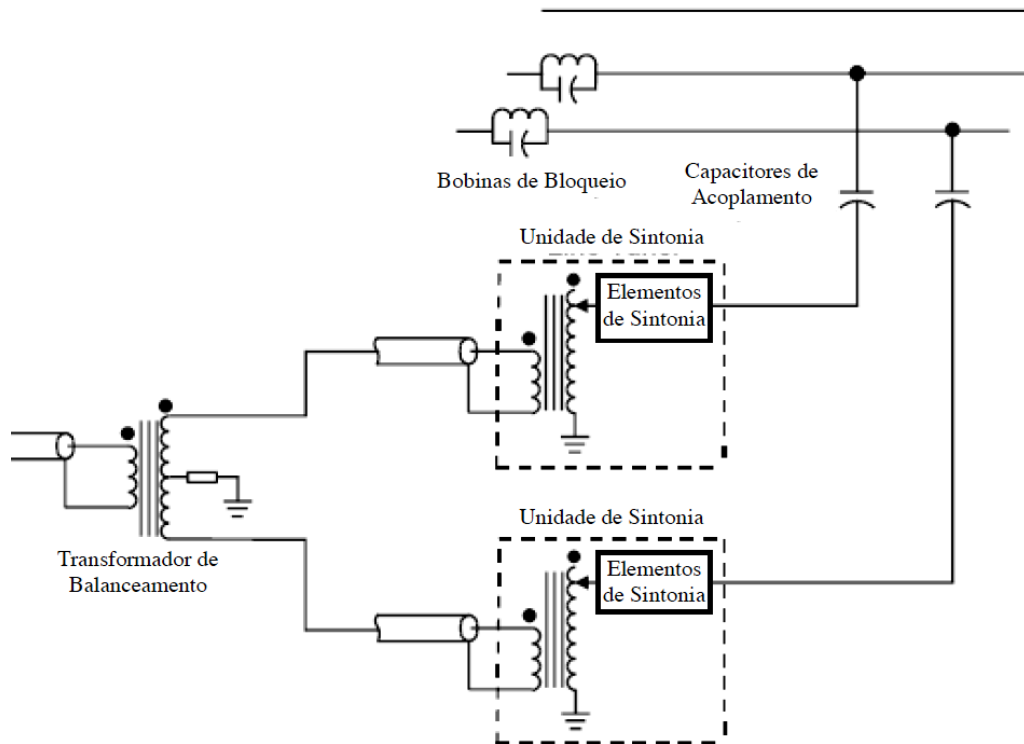


Figura 2.15: Esquema do acoplamento fase-fase [3].

Seu uso é justificado quando se requer segurança na operação mesmo quando um dos condutores está em curto-circuito.

#### ▪ ACOPLAMENTO INTER-CIRCUITOS

Quando duas linhas de transmissão são paralelas e percorrem as mesmas estruturas de suporte, ou quando não estão na mesma estrutura interligando as mesmas subestações, é possível utilizar uma fase de cada circuito de modo a realizar o equivalente a um acoplamento fase-fase, ou ainda duas fases de cada circuito de modo a realizar o acoplamento duplo fase-fase, sendo este último, o que apresenta a maior condição de segurança e o maior custo.

Se um deles é curto-circuitado ou aberto, o acoplamento fica automaticamente convertido em fase-terra. Isto apresenta a vantagem de que se pode aterrar uma das linhas ou mesmo retirá-la de serviço sem perder o enlace de comunicação. No entanto, ocorre um aumento da atenuação, chegando muitas vezes, em torno de 12dB [3].

- ACOPLAMENTO MODO 3 (trifásico)

Neste tipo de acoplamento, o equipamento terminal é conectado às três fases da linha de transmissão de acordo com a figura 2.8. O acoplamento em modo 3 é o que produz menor atenuação e reduz interferências [3]. Devido ao alto custo de implantação, já que necessita de três conjuntos acoplamento, só é utilizado em enlaces críticos ou em linhas extremamente longas de tensão 750kV. Usando este acoplamento é muito improvável que um defeito seja capaz de cancelar totalmente o sinal se apresente simultaneamente nas três fases de uma linha de transmissão.

Como as três fases são utilizadas para transmitir o sinal, existe redundância e se obtém um desempenho melhor que nas configurações anteriores. O rompimento ou a ocorrência de um curto-circuito em um dos cabos coaxiais não ocasionará perda do sinal. Nesse caso, o sistema fica automaticamente transformado em acoplamento fase-fase, dessa forma a atenuação aumenta.

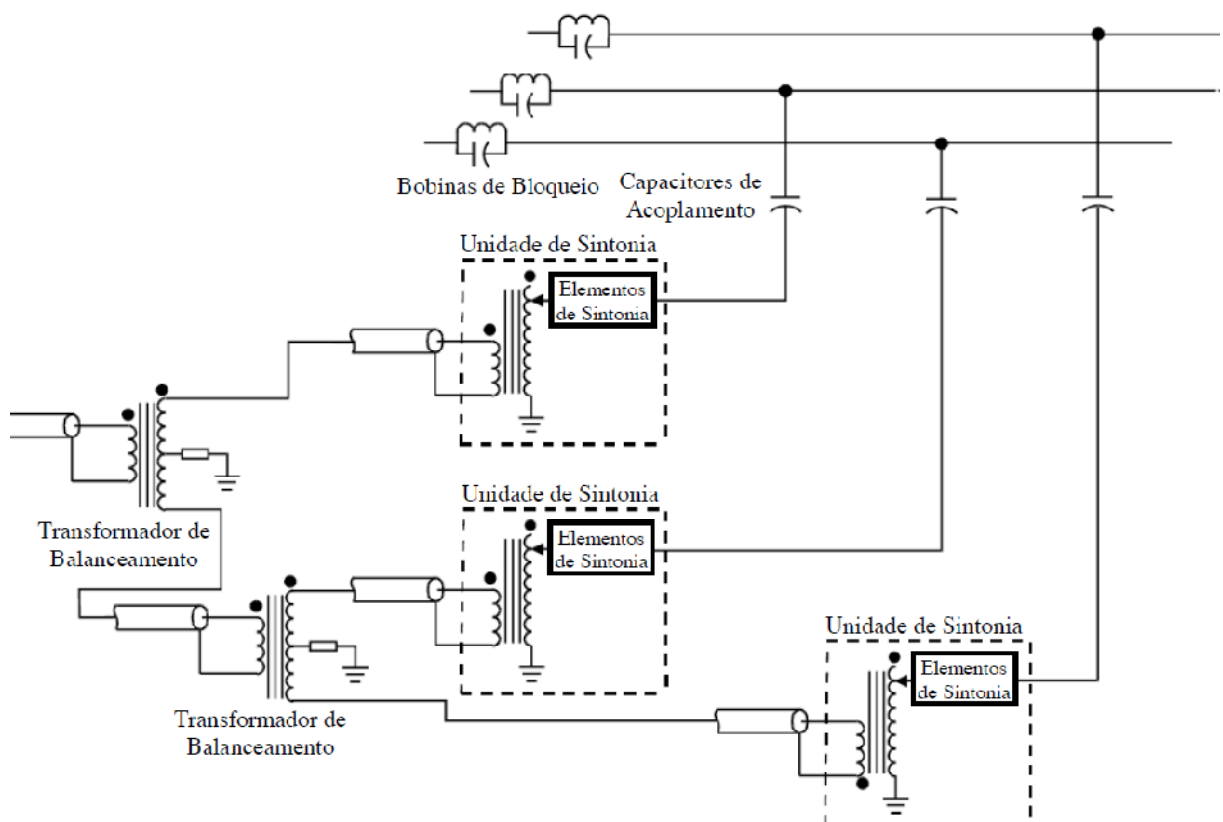


Figura 2.16: Esquema do acoplamento trifásico [3].

O capítulo a seguir descreve o roteiro para o cálculo da potência de recepção e da relação sinal-ruído de um sistema de onda portadora, mostrando as equações e considerações que devem ser feitas para o cálculo do desempenho do sistema.

## **CAPÍTULO 3. CÁLCULO DO DESEMPENHO DOS SINAIS DE UM SISTEMA DE TELEPROTEÇÃO OPLAT**

---

Vários fatores afetam o desempenho de um canal de comunicação OPLAT. Para uma operação confiável do canal é necessário obter duas condições: que o nível de sinal no terminal remoto seja superior à sensibilidade do receptor e que a relação sinal ruído (SNR) esteja, consideravelmente, acima do mínimo aceitável para a aplicação [3]. Dessa forma o receptor poderá fazer uma discriminação correta da informação transmitida.

Nesse capítulo será analisado o nível de recepção e a relação sinal-ruído do sistema de ondas portadoras da linha de transmissão Ibicoara – Brumado de 230kV. A análise será feita através do cálculo matemático da potência de recepção e da relação sinal-ruído considerando os principais fatores que interferem no desempenho dos sinais de onda portadora em linhas de transmissão.

Em seguida será realizada uma comparação entre os resultados obtidos para a condição de tempo ruim e de tempo bom. Se ambos os requisitos citados forem atingidos, pode-se dizer que o canal de comunicação é confiável.

### **3.1. DADOS TÉCNICOS COMERCIAIS DOS EQUIPAMENTOS**

Nesta seção são apresentados os dados técnicos comerciais dos equipamentos utilizados para conectar equipamentos de comunicação a uma rede e energia elétrica. São apresentadas, a seguir, as informações relevantes ao cálculo do desempenho do canal de comunicação OPLAT. Os dados apresentados foram obtidos a partir de um projeto para implantação de um sistema OPLAT associado à linha de transmissão Ibicoara – Brumado.

- EQUIPAMENTO OPLAT

Fabricante:	Siemens
Modelo:	PowerLink
Potência de transmissão:	29,8 dBm
Impedância:	75 $\Omega$

O Equipamento OPLAT possui uma sensibilidade de -32,0dBm na recepção [2]. Isso significa que o nível mínimo de potência do sinal de onda portadora que o receptor poderá constatar é de -32,0dBm, um sinal com o nível de potência menor o receptor não irá detectar.

- BOBINA DE BLOQUEIO

Fabricante:	Alstom
Indutância nominal:	0,2 mH
Corrente nominal:	1250 A
Perda de inserção máxima:	2,5 dB $\pm$ 10%

- CAPACITOR DE ACOPLAMENTO

Transformador de potencial capacitivo 230 kV	
Capacitância total:	4500 pF
Tensão nominal primária:	$230/\sqrt{3}$ kV
Tensão nominal secundária:	66,4 kV e 110,66 kV
Perda de inserção máxima:	0,5 dB $\pm$ 10%

- CAIXA DE SINTONIA

Impedância nominal primária:	240 $\Omega$ a 320 $\Omega$
Impedância nominal secundária:	75 $\Omega$ a 125 $\Omega$
Capacitância de acoplamento:	1,5 nF a 20 nF
Faixa de passagem:	40 kHz a 500 kHz
Perda de inserção máxima:	2 dB $\pm$ 10%

A perda de inserção máxima é a perda máxima no acoplamento do equipamento a linha de transmissão. Para o cálculo do desempenho utiliza-se esse valor crítico, pois nesses casos sempre se considera o pior caso.

### **3.2. CÁLCULO DO NÍVEL DE RECEPÇÃO**

Nesta seção são apresentados os cálculos da potência de recepção de um sistema de onda portadora. Os cálculos são realizados para as condições de tempo bom (clima seco) e ruim (clima úmido, com chuva ou sem chuva). Os parâmetros utilizados foram obtidos com base em especificações técnicas de um projeto para implantação de um sistema OPLAT associado à linha de transmissão Ibicoara – Brumado.

Seja o diagrama de uma linha de transmissão conforme figura 3.1. Para efetuar os cálculos os seguintes dados da linha de alta tensão são necessários:

- Tensão nominal: 230 kV;
- Distância entre as subestações: 95 km;
- Diâmetro do condutor 27 mm;
- Número de condutores por fase: 1;
- Número de transposições: 0;
- Frequência da portadora: 144 kHz;
- Configuração do acoplamento: Fase-fase.

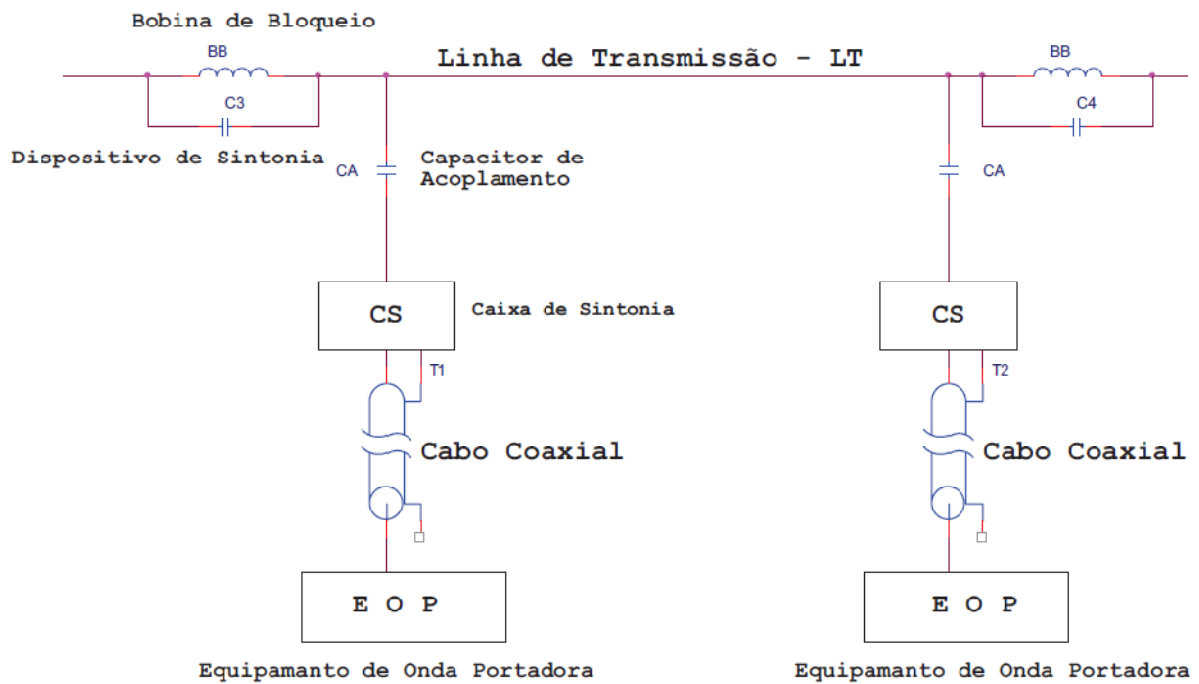


Figura 3.1: Diagrama dos principais componentes de um canal de comunicação OPLAT [1].

De posse destes dados, a potência de recepção pode ser calculada da forma mostrada na equação 3.1.

$$P_{Rx} = P_{Tx} - A_S \quad (3.1)$$

Onde  $P_{Rx}$  é a potência de recepção,  $P_{Tx}$  é a potência de transmissão e  $A_S$  é a atenuação do sistema. Esta última é uma composição das perdas presentes no sistema, de acordo com a equação 3.2.

$$A_S = P_{LT} + P_{Transp} + C_a + P_{acBB_{Tx}} + P_{acCS_{Tx}} + P_{acTPC_{Tx}} + P_{acBB_{Rx}} + P_{acCS_{Rx}} + P_{acTPC_{Rx}} \quad (3.2)$$

Onde  $P_{LT}$  é a perda na linha de transmissão,  $P_{Transp}$  é a perda por transposição,  $C_a$  é a correção de acoplamento,  $P_{acBB}$  é a perda por acoplamento da bobina de bloqueio,  $P_{acCS}$  é a perda por acoplamento da caixa de sintonia e  $P_{acTPC}$  é a perda por acoplamento do transformador de potencial capacitivo. Como os dispositivos de acoplamento são conectados nos dois extremos da linha de



transmissão, as perdas por acoplamento existem tanto no Transmissor ( $T_x$ ) quanto no Receptor ( $R_x$ ).

As perdas na linha de transmissão podem ser obtidas analisando as curvas de atenuação típicas, de acordo com a figura 3.2. Ao se observar a curva de 230kV para a frequência de 144kHz, obtém-se um valor de atenuação de 0,09dB/milhas correspondendo a 0,056dB/km. Para uma linha de 95 km, tem-se uma atenuação de 5,34dB.

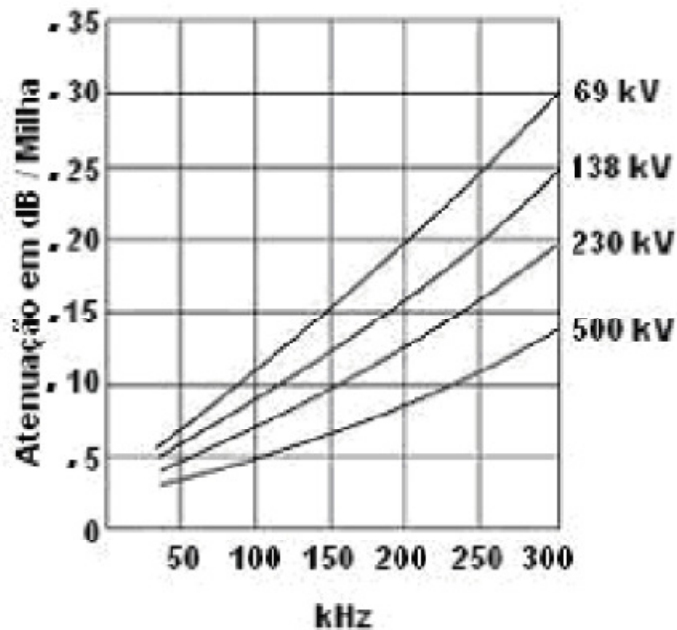


Figura 3.2: Curvas de atenuação típicas para linhas aéreas operando em condições de tempo bom [3].

Nesse caso, as perdas por transposição não serão consideradas, pois o enlace não possui transposições. Já a correção de acoplamento pode ser definida através da tabela 2.2, apresentada na seção 2.4, onde verificamos que a correção para o acoplamento do tipo Fase-Fase é de 2dB.

Os valores das perdas por acoplamento utilizados no cálculo estão de acordo com as especificações técnicas dos equipamentos de acoplamento apresentadas na seção 3.1. A utilização do valor máximo é justificada porque sempre são considerados os valores críticos para os cálculos de desempenho de canais de comunicação.

Considerando a influência das condições climáticas no desempenho dos sinais de onda portadora nas linhas de transmissão, o valor da atenuação para uma

linha de 230kV para tempo ruim deve ser corrigido acrescentando 25% ao valor da atenuação encontrado para tempo bom. Portanto, utilizando o fator de correção de 1,25, a atenuação da linha de transmissão para tempo ruim assume o valor aproximado de 6,67dB.

### 3.3. RESULTADO DOS CÁLCULOS DO NÍVEL DE RECEPÇÃO

De acordo com a equação 3.2, tem-se o seguinte resultado para atenuação do sistema para a condição de tempo bom:

$$A_S = 5,34 + 0 + 2 + 2,5 + 2 + 0,5 + 2,5 + 2 + 0,5 = 17,34 \text{ dB} \quad (3.3)$$

Assim, a potência de recepção é obtida de acordo com a expressão 3.1.

$$P_{Rx} = 29,8 - 17,34 = 12,46 \text{ dBm} \quad (3.4)$$

De forma análoga, para a situação de tempo ruim, tem-se o seguinte resultado para atenuação do sistema:

$$A_S = 6,67 + 0 + 2 + 2,5 + 2 + 0,5 + 2,5 + 2 + 0,5 = 18,67 \text{ dB} \quad (3.5)$$

Conseqüentemente, a potência de recepção terá o seguinte nível:

$$P_{Rx} = 29,8 - 18,67 = 11,13 \text{ dBm} \quad (3.6)$$

O segundo critério que interfere no desempenho do sistema OPLAT é a relação sinal-ruído a ser definida a seguir.

### 3.4. CÁLCULO DO RUÍDO E DA RELAÇÃO SINAL-RUÍDO

Os níveis de ruído para tempo bom e tempo ruim podem ser obtidos através da figura 2.11, apresentada na seção 2.4. Os níveis de ruído extraídos a partir da figura 3.3 para as duas situações são:

$$Ruído_{Tempo\ bom} = -35\ dBm \quad (3.7)$$

$$Ruído_{Tempo\ ruim} = -19\ dBm \quad (3.8)$$

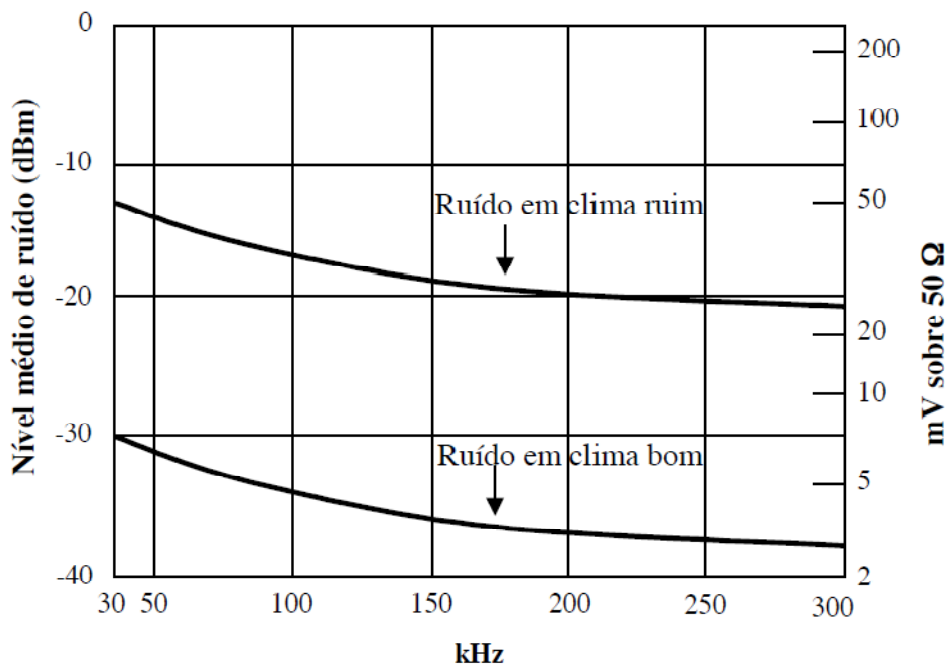


Figura 3.3: Níveis médios de ruído típicos para linhas de 230kV [3].

O valor da atenuação do sinal da portadora antes da sua chegada no ponto de recepção pode ser determinado de acordo com a equação 3.9 e os valores para os níveis de recepção para tempo bom são obtidos através da equação 3.10.

$$A_{Rx\ Tempo\ bom} = P_{LT} + P_{Transp} + C_a + P_{acBB_{Tx}} + P_{acCS_{Tx}} + P_{acTPC_{Tx}} \quad (3.9)$$

$$P_{Rx\ Tempo\ bom} = P_{Tx} - A_{Rx\ Tempo\ bom} \quad (3.10)$$

onde  $A_{Rx\ Tempo\ bom}$  é a atenuação do sinal antes da sua chegada ao receptor e  $P_{Rx\ Tempo\ bom}$  é o nível do sinal antes da sua chegada ao receptor ambos para tempo bom.

Analogamente, o valor da atenuação e a intensidade do nível de recepção para tempo ruim é obtido através das equações 3.11 e 3.12, respectivamente.

$$A_{Rx\ Tempo\ ruim} = P_{LTTR} + P_{Transp} + C_a + P_{acBBTx} + P_{acCSTx} + P_{acTPCTx} \quad (3.11)$$

$$P_{Rx\ Tempo\ ruim} = P_{Tx} - A_{Rx\ Tempo\ ruim} \quad (3.12)$$

onde  $A_{Rx\ Tempo\ ruim}$  é a atenuação do sinal antes da sua chegada ao receptor,  $P_{LTTR}$  é a perda na linha de transmissão para tempo ruim e  $P_{Rx\ Tempo\ ruim}$  é o nível do sinal antes da sua chegada ao receptor para tempo ruim.

Os valores de relação sinal-ruído (SNR) são obtidos para as condições de tempo bom e ruim, respectivamente, de acordo com as equações 3.13 e 3.14.

$$SNR_{Tempo\ bom} = P_{Rx\ Tempo\ bom} - Ruído_{Tempo\ bom} \quad (3.13)$$

$$SNR_{Tempo\ ruim} = P_{Rx\ Tempo\ ruim} - Ruído_{Tempo\ ruim} \quad (3.14)$$

### 3.5. RESULTADO DO CÁLCULO DA RELAÇÃO SINAL-RUÍDO

Calculando o valor da atenuação do sinal da portadora antes da sua chegada ao ponto de recepção de acordo com a equação 3.9, encontramos:

$$A_{Rx\ Tempo\ bom} = 5,34 + 0 + 2 + 2,5 + 2 + 0,5 = 12,34dB \quad (3.15)$$

O valor para o nível do sinal antes da sua chegada ao receptor para tempo bom é obtido através da equação 3.10.

$$P_{Rx \text{ Tempo bom}} = 29,8 - 12,34 = 17,46 \text{ dB} \quad (3.16)$$

O valor da atenuação e do nível do sinal antes da sua chegada ao receptor para tempo ruim obtido através das equações 3.11 e 3.12, respectivamente, foi:

$$A_{Rx \text{ Tempo ruim}} = 6,67 + 0 + 2 + 2,5 + 2 + 0,5 = 13,67 \text{ dB} \quad (3.17)$$

$$P_{Rx \text{ Tempo ruim}} = 29,8 - 13,67 = 16,13 \text{ dBm} \quad (3.18)$$

Por fim, os valores da relação sinal-ruído (SNR) para tempo bom e para tempo ruim, calculados de acordo com as equações 3.9 e 3.10, utilizando os valores definidos nas equações 3.3 e 3.4, são apresentados a seguir:

$$SNR_{\text{Tempo bom}} = 17,46 - (-35) = 52,46 \text{ dB}$$

$$SNR_{\text{Tempo ruim}} = 16,13 - (-19) = 35,13 \text{ dB}$$

## **CAPÍTULO 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS**

---

### **4.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS PARA CONDIÇÃO DE TEMPO BOM**

O valor do nível de recepção da portadora do sistema OPLAT calculado para condições de tempo bom foi de 12,46dBm, para uma potência de transmissão de 29,8dBm. Nestes cálculos sempre são consideradas as piores condições. A atenuação da linha para condições de tempo bom foi considerada de 5,34dB, para uma linha de transmissão de 95 km.

A perda por acoplamento da caixa de sintonia, do capacitor de acoplamento e da bobina de bloqueio nos cálculos foi considerada 5dB no transmissor e 5dB no receptor, totalizando 10dB. É possível notar que a perda por acoplamento tem o maior peso no cálculo da atenuação do sinal da portadora.

O nível de ruído, para a condição de tempo bom em uma linha de 230kV obtido através da figura 3.3 foi de -35dBm. Portanto, a relação sinal-ruído para tempo bom encontrada foi 52,46dB.

Como, a nível de projeto, a análise do desempenho do sistema é sempre feita considerando as piores situações, faremos uma análise mais detalhada dos resultados obtidos para condições climáticas adversa comparando com os resultados encontrados para clima bom.

### **4.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS PARA CONDIÇÃO DE TEMPO RUIM**

Os valores calculados para condição de tempo bom e de tempo ruim apresentaram resultados próximos no que se refere à atenuação da potência do sinal da onda portadora. O valor do nível de recepção da portadora do sistema OPLAT calculado para condições de tempo ruim foi de 11,13dBm, para uma potência de transmissão de 29,8dBm. Esses valores demonstram a existência de uma grande

margem de potência disponível para o sinal da portadora. Isso ocorre porque o sistema OPLAT é superdimensionado, para garantir a segurança do sistema elétrico de potência.

A atenuação da linha de transmissão para condições de tempo ruim assume o valor aproximado de 6,67dB. É possível observar que a diferença entre o valor da atenuação para tempo bom e o valor para tempo ruim é de, aproximadamente, 1,3dB.

As perdas por acoplamento mantêm o mesmo valor do considerado para tempo bom, já que foi considerada, a critério de cálculo matemático, a perda máxima apresentada nas especificações técnicas dos equipamentos de acoplamento.

Finalmente cabe mencionar a relação sinal-ruído é um fator de extrema importância a ser considerado ao implantar um sistema OPLAT. O resultado dos cálculos mostrou que o nível de ruído aumenta bastante em condições de tempo adversas. O nível de ruído, para a condição de tempo ruim em uma linha de 230kV obtido através da figura 3.3 foi de -19dBm. Portanto, a relação sinal-ruído para tempo ruim encontrada foi 35,13dB menor que o valor encontrado para tempo bom, como esperado. Isso significa que a razão entre a potência do sinal no receptor e o nível do ruído, nas condições adversas, é menor do que na condição de tempo bom.

É considerável como aceitável, para critério de projeto, uma relação sinal-ruído da ordem de 15dB para sinais de teleproteção [2], portanto verifica-se a existência de margem disponível para o enlace de onda portadora.

A figura 4.1 apresenta um gráfico do desempenho do sistema de ondas portadoras com relação ao nível de recepção do sinal da portadora em condições de tempo adversas. Desta forma é possível visualizar a existência de margem de potência disponível para o enlace OPLAT.

Na figura 4.2 é apresentado o gráfico do desempenho do sistema OPLAT com o resultado da relação sinal-ruído do enlace na condição de tempo ruim. De acordo com o gráfico também é possível visualizar a existência de margem de potência disponível para o enlace OPLAT.

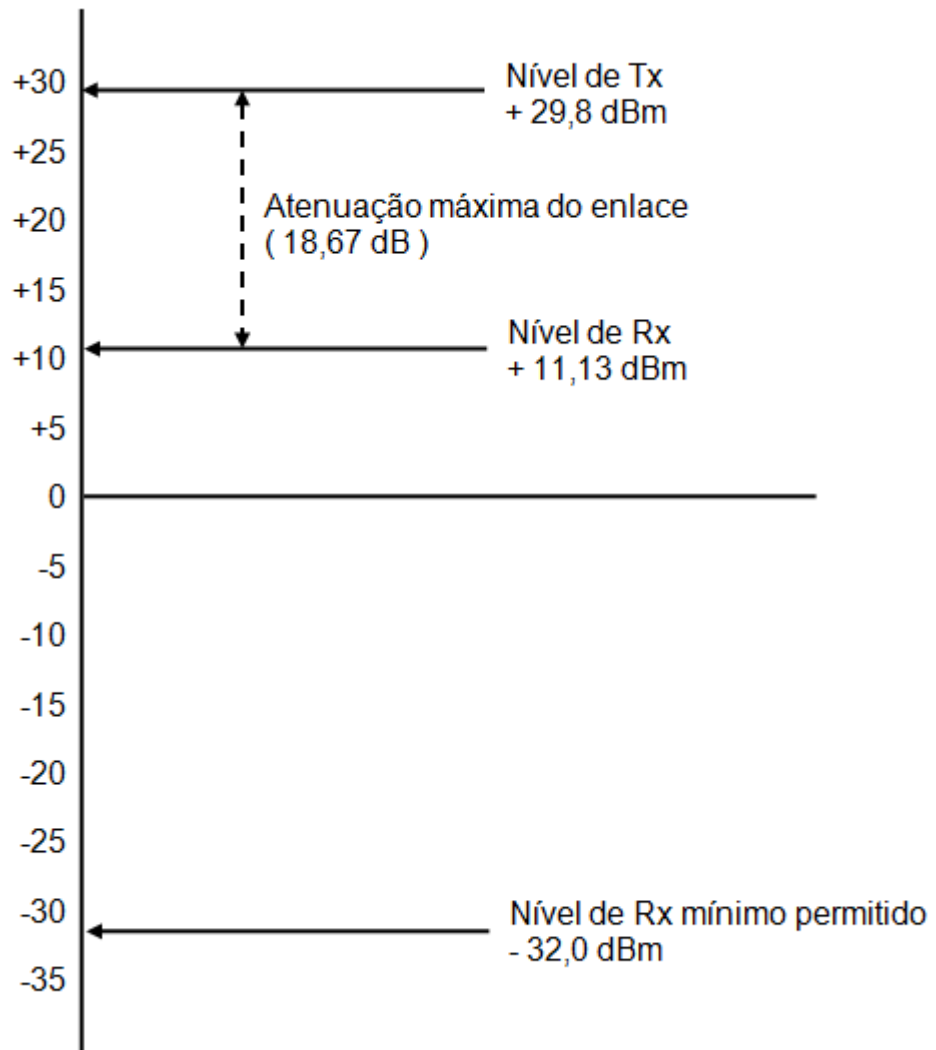


Figura 4.1: Nível de recepção do enlace OPLAT para tempo ruim.



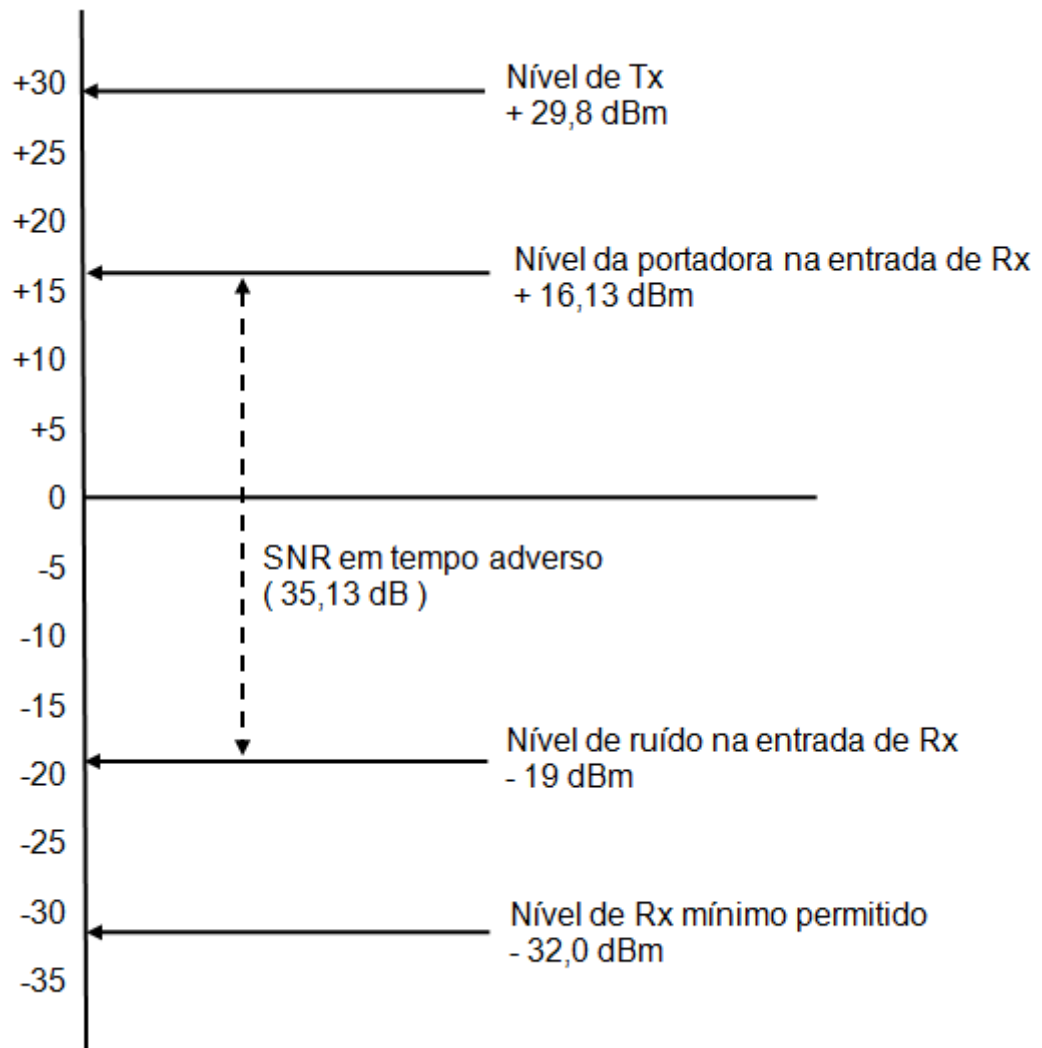


Figura 4.2: Relação sinal-ruído do enlace OPLAT para tempo ruim.

Diante da grande margem de potência disponível para o enlace de teleproteção podemos concluir que o sistema OPLAT é superdimensionado. É importante salientar que esse superdimensionamento não aumenta o custo de implantação do sistema. O fato é que o sistema OPLAT é uma solução para a comunicação entre localidades muito distantes, sendo essa uma das principais vantagens desta técnica quando comparada, por exemplo, aos sistemas de comunicação digital.

Os novos sistemas digitais permitem fazer uma utilização mais eficiente da largura de banda, enquanto que os sistemas tradicionais de PLC analógicos têm vantagens quando as condições de transmissão não são as ideais, principalmente quando a relação sinal-ruído é baixa.

## **CAPÍTULO 5. CONCLUSÃO**

---

Onda portadora é uma solução bastante econômica para fornecer um número pequeno de canais de comunicação para longas distâncias. Exemplos práticos já implementados com essas soluções confirmam suas vantagens práticas, técnicas e econômicas [5]. Tendo em vista que a distância sobre a qual o sistema precisa operar, praticamente, não interfere nos custos de instalação. Apenas a potência do transmissor deve ser determinada de acordo com a distância de transmissão, por isso o uso da palavra praticamente. Porém, onda portadora é suscetível aos ruídos da linha de transmissão e tem que operar numa faixa limitada do espectro de frequência.

Diante dos resultados obtidos através do cálculo matemático do nível de recepção do sinal e da relação sinal-ruído é possível concluir que o desempenho do sistema é considerado satisfatório. A existência de uma grande margem do nível de potência e da relação sinal-ruído disponível garante o correto funcionamento do sistema de teleproteção, possibilitando o correto gerenciamento dos centros de geração e transmissão de energia.

Desta forma conclui-se que a utilização ondas portadoras em linhas de alta tensão para a transmissão de sinais de teleproteção entre subestações é uma solução eficiente. Porém, é essencial levar em consideração a distância do sistema, as perdas por atenuação e por acoplamento, a frequência de operação e os níveis de ruído para tempo ruim no momento de definir a potencia do transmissor.

Apesar de existir uma tendência de que redes digitais de comunicação de dados via fibras ópticas venham a substituir os tradicionais sistemas OPLAT, esses sistemas permanecem em uso e continuarão sendo uma alternativa de comunicação para diversas aplicações, principalmente àquelas aplicações de longas distâncias, em que a utilização de cabos de fibra óptica seja, técnica ou economicamente, inviável.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [1] ADAMI, J. F.; SILVEIRA, P. M.; PARENTONI, M. F. C.; DALLBELLO, A. C. *Modelagem e Simulação de um Sistema de Ondas Portadoras através do Simulink/Matlab*. Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI. Centrais Elétricas Matogrossenses S.A. – CEMAT.
- [2] CHESF. *Sistema de Teleproteção OPLAT 230kV – Projeto Executivo*. Recife, 2009.
- [3] CORDEIRO, L. *Curo básico de ondas portadoras*. Recife, 1985.
- [4] LAMAR, M. V. *Capítulo 2 – Modulação em Amplitude*. Paraná: Universidade Federal do Paraná, Dep. de Engenharia Elétrica. Apostila.
- [5] MURATA, M. M.; FERREIRA, A. E. *Vantagens dos Serviços Convergentes sobre Linhas de Alta Tensão*. Inc: XIII ERIAC – Décimo Terceiro Encontro Regional Iberoamericano do Cigré, 2009, Puerto Iguazú.
- [6] SAKANE, F. T. *Princípios de Telecomunicações I - ELE-31 – Notas de aula*. São José dos Campos, SP: Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, 1997. Apostila.