



Curso de Engenharia Elétrica - Campinas

TCC – Projeto

---

DANYLLO MASSAMI ISSAYAMA

**SOLUÇÃO PARA TRANSMISSÃO DE COMANDOS  
ELÉTRICOS SOB INFLUÊNCIA DE REDE DE MÉDIA  
TENSÃO**

---

Campinas

2011

DANYLLO MASSAMI ISSAYAMA

**SOLUÇÃO PARA TRANSMISSÃO DE COMANDOS  
ELÉTRICOS SOB INFLUÊNCIA DE REDE DE MÉDIA  
TENSÃO**

Projeto do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade São Francisco, como requisito à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. William Cesar Mariano

Campinas  
2011

“O que mais surpreende é o homem, pois perde a saúde para juntar dinheiro, depois perde o dinheiro para recuperar a saúde. Vive pensando ansiosamente no futuro, de tal forma que acaba por não viver nem o presente, nem o futuro. Vive como se nunca fosse morrer e morre como se nunca tivesse vivido.” (Dalai Lama)

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

Prof. William Cesar Mariano (orientador)

---

Prof. Débora Meyhofer Ferreira

---

Eng. Gabriel Caro de Godoy

---

Prof. Luiz Carlos de F. Júnior (suplente)

---

Prof. Geraldo Peres Caixeta (suplente)

Campinas, 09 de dezembro de 2011.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, que me zelou e orientou em todos os meus atos, desde o primeiro dia da minha vida até a concretização de mais esta etapa. Sem a minha fé a ele depositada, certamente não teria chegado até aqui.

Aos meus pais Inácio e Sônia, pela dedicação incondicional, pela educação dada e por todo o amor e carinho dado em toda a minha vida, só tenho a agradecer. Aos meus irmãos Lucas e Luidy, por todo apoio e companheirismo. À minha namorada Patrícia, por tudo o que representa na minha vida e por ter se tornado ao longos dos anos minha melhor amiga e a pessoa da qual tenho conseguido compartilhar todos os meus sonhos.

Ao meu orientador William Cesar Mariano, que possuo grande admiração e total confiança em sua excelência no meio acadêmico, agradeço pela contribuição com seu vasto conhecimento técnico, dedicação e paciência para me auxiliar na concretização deste trabalho.

E a todas as pessoas que de certa forma contribuíram para a minha formação pessoal e profissional, meus sinceros agradecimentos.

## RESUMO

O roubo de cabos de cobre de linhas de transmissão de energia tem se tornado alarmante em alguns pontos específicos do Brasil. Mais precisamente no Nordeste, onde as diferenças sócio-econômicas se tornam ainda mais evidentes, esta modalidade de crime já se tornou corriqueira, trazendo inúmeros prejuízos para as concessionárias e empresas. Para evitar este problema, uma grande empresa do ramo de bebidas, para coletar água de poços localizados além dos limites do seus terrenos, instalou bombas alimentadas por uma rede elétrica de média tensão pela robustez deste sistema. Devido ao fato de que a distância entre os poços e o ponto de entrada de energia da fábrica era muito grande, era necessário realizar a instalação de um sistema de acionamento à distância por meio de uma botoeira. Para tanto, não seria possível realizar este acionamento por meio de cabos comuns, por haver o fenômeno denominado acoplamento eletromagnético entre a rede de média tensão os cabos do comando elétrico. Este trabalho tem por objetivo apresentar a implantação e características da rede eletro-óptica, que foi a solução encontrada, colocando em foco seus prós e contras em relação a outras tecnologias.

**Palavras-chaves:** acoplamento eletromagnético. linhas de transmissão. rede eletro-óptica.

## ABSTRACT

The theft of copper cables of power transmission lines has become alarming in some specific locations of Brazil. More precisely in Northeast, where socioeconomic differences become even more evident, this type of crime has become commonplace, bringing losses for numerous dealerships and businesses. To avoid this problem, a great beverage company, to collect water from wells located beyond the boundaries of their land, installed pumps powered by a medium voltage power grid due to the robustness of this system. Due to the fact that the distance between the wells and the entry point of the power plant was very large, it was necessary to perform the installation of a drive system at a distance by means of a pushbutton. To do so, this wouldn't be possible to drive through standard cables, because there's the phenomenon known as electromagnetic coupling between the network medium voltage and the electrical control cables. This paper aims to present the implementation and characteristics of the electro-optic network, which was the solution, focusing on its advantages and disadvantages over other technologies.

**Key-words:** electromagnetic coupling. transmission lines. electro-optic network

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	American National Standards Institute
APD	Avalanche Photodiode (Fotodiodo Avalanche)
ART	Anotação de Responsabilidade Técnica
BT	Baixa Tensão
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCM	Centro de Controle de Motores
CLP	Controlador Lógico Programável
DIN	Deutsches Institute fur Normung
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
FP	Fator de Potência
IEC	International Electrotechnical Commission
IHM	Interface Homem-Máquina
ILD	Injection Laser Diode (Diodo injetor de laser)
LED	Light-emitting diode (Diodo emissor de luz)
LT	Linha de Transmissão
MT	Média Tensão
NEMA	National Electrical Manufactures Association
NR	Norma Regulamentadora
NR	Norma Regulamentadora
OMS	Organização Mundial de Saúde
PLC	Programable Logic Control
RF	Rádio Freqüência
RMS	Root Mean Square
TC	Transformador de Corrente

# SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>1. CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS</b> .....	14
1.1 Campos elétricos.....	14
1.2 Campos magnéticos.....	19
1.3 Relação entre os campos.....	21
<b>2. LINHAS DE TRANSMISSÃO</b> .....	24
2.1 Diagrama de uma linha de transmissão.....	25
2.2 Linhas trifásicas.....	25
2.2.1 Classes de tensão em linhas trifásicas.....	26
2.3 Interferências eletromagnéticas devido às LT's.....	27
2.3.1 Acoplamento eletromagnético entre LT e outros circuitos.....	28
2.3.2 Campo eletromagnético e a segurança do ser humano.....	30
<b>3. PAINÉIS ELÉTRICOS</b> .....	32
3.1 Painéis de baixa tensão.....	32
3.1.1 Painéis de distribuição e sub-distribuição.....	32
3.1.1.1 Bancos de capacitores.....	33
3.1.2 CCM – Centro de controle de motores.....	34
3.1.3 Painéis de controle.....	34
3.1.4 Painéis de acionamento – Drives.....	35
3.2 Motores elétricos.....	36
3.2.1. Motor de indução trifásico.....	37
3.3 Partidas de motores.....	38
3.3.1 Partida direta.....	39
3.3.2 Partida estrela-triângulo.....	40
3.3.3 Partida soft-starter.....	41
3.3.4 Partida com inversor de frequência.....	43
3.5 Painéis de média tensão.....	43
3.6 Símbolos literais.....	45
<b>4. ÓPTICA</b> .....	47
4.1 Propriedades da luz.....	48
4.1.1. Índice de refração.....	48
4.1.2 Reflexão e refração.....	48
4.2 Fibra óptica.....	49
4.2.1 Propagação na fibra óptica.....	51

4.2.2 Atenuação.....	52
4.3 Sistemas de comunicação por fibra óptica.....	53
4.3.1 Fontes ópticas.....	54
4.3.2 Detectores ópticos.....	55
4.3.3. Repetidores e amplificadores ópticos.....	56
4.3.4 Conexões.....	56
4.4 Rede eletro-óptica.....	57
<b>5. ESTUDO DE CASO.....</b>	<b>58</b>
5.1 Problema apresentado.....	60
5.2 A solução encontrada.....	61
5.2.1 Comparativo com outras tecnologias.....	62
5.3 Implantação do sistema eletro-óptico.....	63
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>71</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>72</b>

## INTRODUÇÃO

No nordeste brasileiro, grandes empresas do ramo de bebidas têm, nos últimos anos, enfrentado problemas de roubo de cabos de cobre que se encontram distantes dos núcleos de suas fábricas. No caso específico a ser apresentado, por se tratar da matéria prima primordial e, por razões óbvias, os poços de água não eram capazes de suportar a demanda de produção. Assim, foram adquiridas propriedades com poços para extração, que se encontravam a alguns quilômetros de distância.

Como a distância entre os poços até os ambientes de trabalho dos operadores de máquinas era muito longa e, principalmente, devido aos casos constantes de roubo, foram instalados postes que transmitiam média tensão e, para a alimentação de cada poço em 380V, foram instalados transformadores abaixadores.

O problema a ser resolvido foi então realizar o acionamento a distância destes poços, para evitar o deslocamento de um único funcionário por longas distâncias, apenas para este fim. Apesar de ser um comando simples, um cabo comum de cobre sofreria forte influência eletromagnética da linha de média tensão e, conseqüentemente, não seria capaz de transmitir o sinal desejado.

A solução encontrada, após uma série de comparativos técnicos e comerciais, foi a utilização de uma rede elétrico-óptica, na qual é associado às extremidades comunicantes do sistema (sistema de acionamento e o painel de partida das bombas), um conjunto que engloba transmissores e receptores ópticos, conversores elétrico-ópticos e a fibra óptica propriamente dita.

Para o correto entendimento da problemática em questão, no Capítulo 1, é são introduzidos os fundamentos básicos do eletromagnetismo e depois, no Capítulo 2, a sua aplicação às linhas de transmissão. Este estudo nada mais é, do que uma ponte de ligação ou transição entre teoria de circuitos (que por si só já é um caso de teoria eletromagnética geral) e o eletromagnetismo. No final deste capítulo, é detalhado o problema central do estudo, o fenômeno conhecido como acoplamento eletromagnético em linhas de transmissão.

Agregados estes valores, parte-se para o estudo de normas e classificações de painéis elétricos de maneira geral no Capítulo 3, visando explicar o acionamento e maneiras distintas de partidas de motores elétricos e a instalação dos mesmos. Faz-se necessário também a compreensão das diferenças técnicas e normativas de baixa e média tensão, assim como a diferença de circuitos de potência e comando. Modelos de projetos já realizados serão utilizados para melhor ilustrar este tema.

No Capítulo 4, a óptica é o tema principal, demonstrando as propriedades da luz e, após isso, como aplicação as fibras ópticas, exaltando seus princípios técnicos, como a eficiência na transmissão e distâncias de operação, bem como aspectos físicos como durabilidade e resistência. Ao final deste capítulo, serão introduzidas as redes elétrico-ópticas, que são tecnologias muito empregadas no ramo das redes de computadores. Estruturalmente, os principais componentes terão seus princípios de funcionamento detalhados. Apesar das inúmeras aplicações, a essência da sua estrutura é basicamente a mesma.

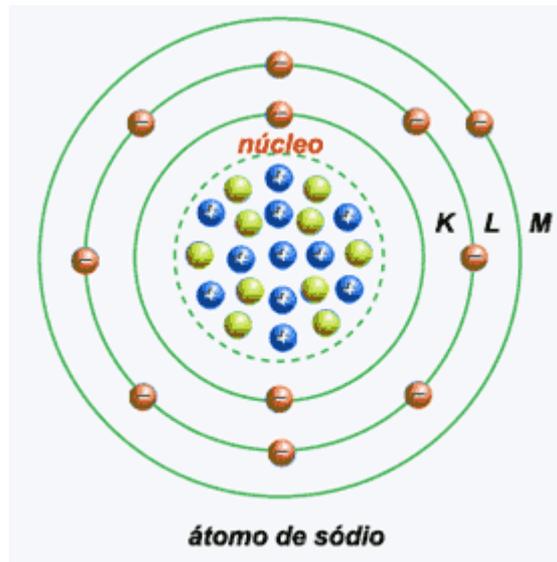
O Capítulo 5 será apresentado em formato de estudo de caso. Uma vez que o conhecimento teórico envolvido já tenha sido passado, este capítulo possuirá seus tópicos voltados a apresentação de projetos técnicos, a implantação em campo, os resultados obtidos após a instalação e, por fim, a justificativa da escolha da tecnologia, apresentando prós e eventuais contras em relação a outras tecnologias apresentadas.

# 1. CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS

Este capítulo apresentará os conceitos básicos de campos elétricos e campos magnéticos, bem como a relação entre eles, sem se ater a detalhes aprofundados, possibilitando a introdução a modelos práticos e aplicações do estudo central.

## 1.1 Campos elétricos

Segundo WENTWORTH [...] (2009), com o auxílio da Física clássica, têm-se que, a matéria é constituída de átomos, e estes por sua vez, são formados basicamente de três elementos: prótons (partículas positivas), elétrons (partículas negativas) e nêutros (partículas neutras), sendo que os dois primeiros são também conhecidos como cargas. Verifica-se que prótons e nêutros são partes constituintes do núcleo e os elétrons executam trajetórias em torno deste, conforme ilustrado na figura 1.1, onde os elétrons são representados pelos círculos laranjas e os prótons e nêutros pelos círculos azuis e amarelos, respectivamente.



Fonte: <<http://www.tecnologiadoglobo.com/2009/03/materia-atomos-protos-electros-tabela-periodica/>>

Figura 1.1 Estrutura atômica. Átomo de sódio.

Pode-se verificar que estas cargas interagem entre si, resultando em uma força fundamental da natureza, conhecida como força eletrostática e que se refere a Lei de Coulomb. Quando são aproximados corpos carregados com cargas iguais (de mesma polaridade), é criada a força de repulsão, da mesma maneira, mas com cargas diferentes, é criada a atração. A intensidade da força de atração ou repulsão das cargas pode ser mensurada através de suas magnitudes e pela distância entre elas, sendo que, esta última é

considerado o valor da distância ao quadrado e inversamente proporcional. Na Figura 1.2, são representadas duas cargas situações, onde existe uma carga  $Q$  influenciando demais as demais cargas  $q_1$  e  $q_2$ , sendo que, na primeira, a carga menor é submetida ao fenômeno da atração e na segunda, a carga existe o fenômeno da repulsão.

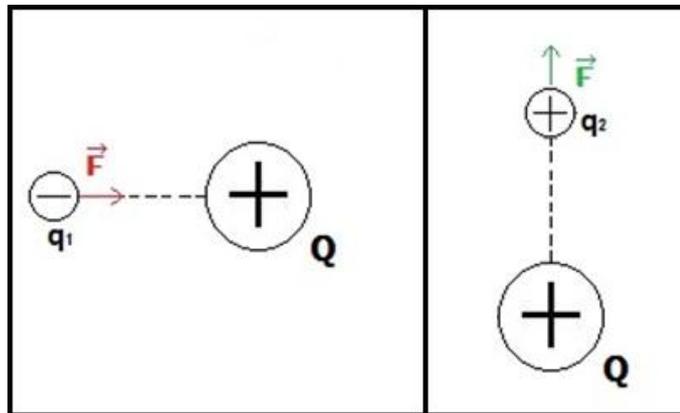
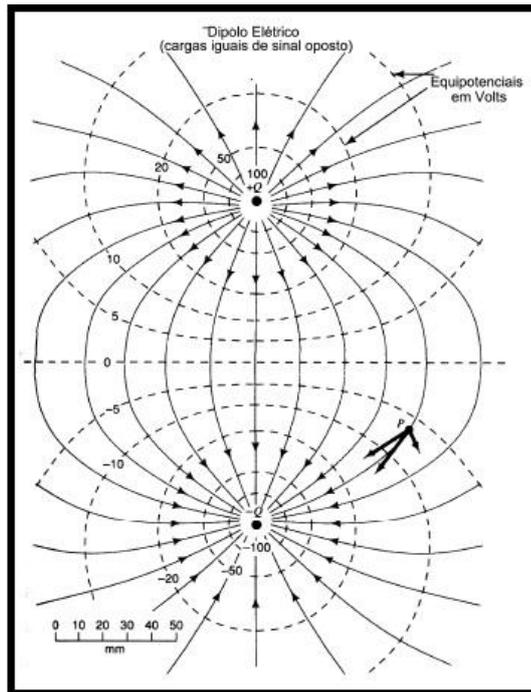


Figura 1.2. Forças atuantes das cargas.

Se a força exercida sobre um elétron após a aproximação a outra carga equivalente for medida, verifica-se que, em um determinado plano, este elétron traça uma trajetória. O mapeamento desta distribuição espacial desta trajetória, que é oriunda da força de deslocamento deste elétron, é denominado campo.

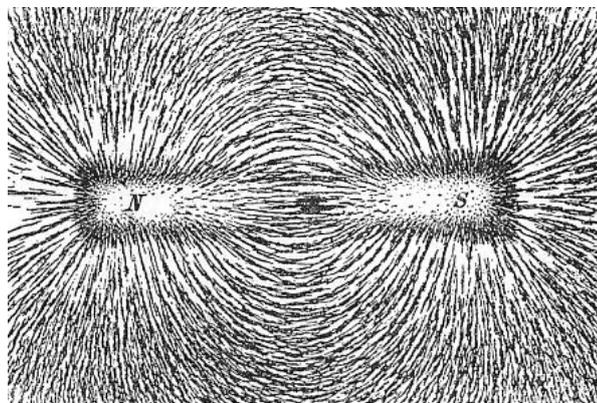
Aplicados estes conceitos e tomando como referencial o campo entre núcleo e elétrons, pode-se mapear um campo vetorial, no qual obtêm-se a direção e a intensidade das forças atuantes sobre a carga. Assim como o mapeamento do campo gravitacional, no qual os valores apontam para o centro de gravidade, o vetor força deve sempre ter direção voltada ao núcleo.

Assim como o elétron exerce uma força no núcleo, este por sua vez também exerce força contra o elétron. Efetuando a divisão desta força pela carga do elétron, obtêm-se um valor que representa a força exercida por este núcleo sobre qualquer carga genérica em qualquer quantidade. O fator encontrado é denominado campo elétrico do núcleo. Uma vez encontrado este campo, é possível calcular qualquer força que atue sobre qualquer corpo carregado que esteja sob sua influência. Desta maneira, as linhas de campo elétrico iniciam sua trajetória nas cargas positivas e terminam nas negativas, conforme mostrado na Figura 1.3, na qual existem duas cargas iguais com sinais opostos e o sentido das linhas de campo. A Figura 1.4 está associada a diferença dos sinais dos pólos, representando a trajetória das linhas do campo elétrico através da clássica experiência, na qual é utilizado um ímã comum, sobre uma folha de papel e pó de grafite. Ao colocar o grafite ao redor do ímã, formam-se as linhas de campo.



Fonte: Apostila do Instituto de Física da Unesp-Guaratinguetá "Mapeamento e Traçado de linhas equipotenciais e determinação de Campo Elétrico"

Figura 1.3. Linhas de Campo Elétrico



Ref: <<http://gaea-habitat.blogspot.com/2011/04/conhecimento-veja-as-linhas-do-campo.html>>

Figura 1.4. Experiência Ímã

Para representar de maneira mais prática o campo elétrico, podemos citar como exemplo os capacitores. Constituídos de duas placas condutoras, separadas por uma camada bem fina de material não condutor (dielétricos), tal como o ar, plástico ou cerâmica. Os capacitores tem, como função principal, o armazenamento de cargas em suas placas e principalmente a energia eletrostática associada a carga. Uma das placas é carregada com cargas positivas e a outra com cargas negativas. A capacidade de armazenar a energia referente às cargas é denominada capacitância. Mais precisamente, a capacitância é a

razão entre o módulo  $Q$  da carga em cada placa e a diferença de potencial  $\Delta V$  entre as placas dada por:

$$C = \frac{|Q|}{\Delta V}$$

Por convenção, as grandezas presentes nesta equação são positivas e, por consequência, a capacitância também é positiva. Pelo SI, a unidade de capacitância é o Faraday (F).

A capacitância pode ser determinada também pela função que relaciona os aspectos estruturais do capacitor, demonstrados através da Figura 1.5, que representa as duas placas condutoras.

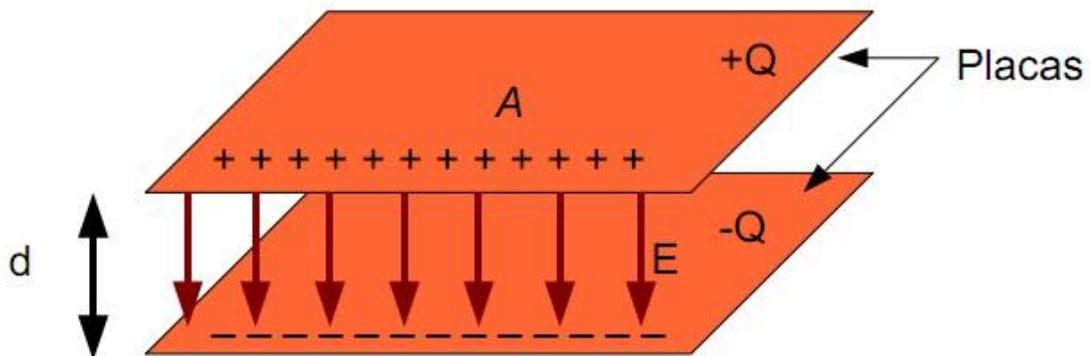


Figura 1.5. Estrutura do Capacitor

Assim, obtêm-se a seguinte expressão:

$$C = \frac{\epsilon A}{d}$$

Onde,  $\epsilon$  é a permissividade do meio entre as placas,  $A$  a área das placas e  $d$  a distância entre elas.

Analisando esta expressão, é visto que, a capacitância é proporcional à permissividade  $\epsilon$  (épsilon) do dielétrico. Quanto maior a permissividade do meio, maior a capacitância.

De maneira geral, a permissividade dos dielétricos pode ser dada através do produto entre a permissividade do espaço livre  $\epsilon_0$  (vácuo) e a permissividade relativa  $\epsilon_r$  do

dielétrico, ou seja,  $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ . A permissividade do espaço livre pode ser representada pela fórmula:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi K_0}$$

Sendo  $K_0$  a constante eletrostática no vácuo, que, pelo SI, possui o seguinte valor:

$$K_0 = 8,9875 \cdot 10^9 \frac{Nm^2}{C^2} \text{ (Newton x metro ao quadrado / Coulomb ao quadrado)}$$

Desta maneira, encontramos o seguinte valor para a permissividade relativa no vácuo:

$$\varepsilon_0 = 8,854238837 \times 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2} \text{ (Coulomb ao quadrado/Newton x metro ao quadrado)}$$

$$\text{Ou } \varepsilon_0 = 8,854238837 \times 10^{-12} \frac{F}{m} \text{ (Faraday/metro)}$$

Assim, podemos listar alguns valores de permissividade relativa  $\varepsilon_r$  para o efetivo cálculo da permissividade  $\varepsilon$ :

Elemento	$\varepsilon_r$
Ar	1,0005
Polietileno	2,26
Silício (puro)	11,8
Teflon	2,1
Quartz (fundido)	3,8

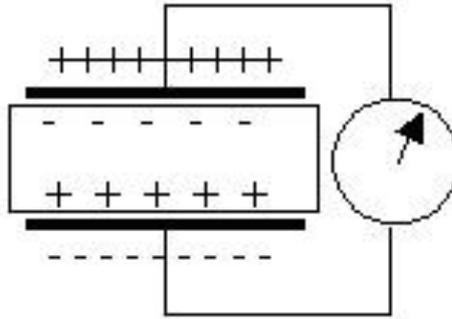
Seguindo esta linha de raciocínio, é possível se demonstrar a expressão em que se determina o campo elétrico gerado entre as placas condutoras:

$$E = \frac{|Q|}{\varepsilon A}$$

O dielétrico é formado por uma substância dotada de alta resistência ao fluxo de corrente elétrica mas, ao contrário do que possa se pensar, possui propriedades que influenciam a quantidade de campo elétrico entre as placas e estão diretamente ligados à capacitância do capacitor.

Supondo que um dielétrico seja colocado entre as placas condutoras, ao ser polarizado, o material, sendo isolante, fará com que exista um excesso de cargas negativas

na parte superior do dielétrico e igual quantidade de cargas positivas na parte inferior, conforme a Figura 1.6. Neste caso, o campo entre as placas, diminuirá e, se observada a equação  $C = \frac{|Q|}{\Delta V}$ , conclui-se que o potencial também diminuirá. Assim, a capacitância deverá aumentar.



Ref: <[http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/mod05/m\\_s07.html](http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/mod05/m_s07.html)>

Figura 1.6. Polarização Capacitor com Dielétrico

## 1.2 Campos magnéticos

Enquanto partículas carregadas são responsáveis pela formação de um campo elétrico, cargas se movimentando geram um campo magnético. Da mesma forma que as linhas de campo presentes no campo elétrico possuem trajetória determinada da carga positiva para a negativa, as linhas de campo dos campos magnéticos também demarcam trajetórias, porém, sem nenhum ponto inicial ou final. Praticamente são formados por laços contínuos que circundam a fonte do campo.

Para demonstrar uma aplicação real dos campos magnéticos podemos demonstrar um componente armazenador, da mesma maneira que os capacitores estão para campos elétricos. O nome deste componente é indutor e sua composição é formada por uma espira feita por um determinado fio condutor de modo que, ao aplicar uma corrente neste condutor, seja formado um campo magnético.

A equação fundamental para os indutores, relaciona a tensão induzida por um campo magnético variável à corrente responsável pelo campo, sendo que, a tensão variável de um indutor qualquer é proporcional a taxa de variação de corrente que o atravessa. Assim, têm-se que:

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$

Onde L, é a grandeza física que mensura a capacidade de armazenamento de energia de um elemento (no caso o indutor), através de um campo magnético. Possui o nome de indutância e sua unidade é o Henry (H).

A intensidade do campo gerado no indutor é determinada pela permeabilidade  $\mu$  (m), que representa a diferença dos valores de indução magnética de acordo com cada material e é dada através da expressão criada por Biot e Savart, que relaciona o fluxo magnético (B) e o campo magnético exterior ao objeto (H) :

$$\mu = \frac{B}{H}$$

Tempos depois que esta equação foi divulgada, Ampère apresentou outra lei inserindo uma constante magnética do vácuo, denominada  $k_m$ . Para tanto, após algumas simplificações, surgiu:

$$k_m = \frac{\mu_0}{4\pi}$$

Como pelo SI,  $k_m$  possui valor de  $10^{-7}$ , têm-se como valor de  $\mu_0$ :

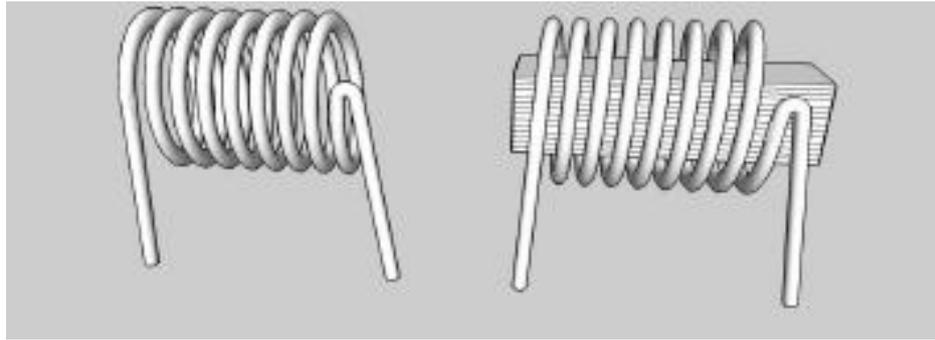
$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{H}{m} \text{ (Henry/metro)}$$

A permeabilidade é obtida através do produto entre a permeabilidade do espaço livre (vácuo)  $\mu_0$  e a permeabilidade relativa do material  $\mu_r$ , ou seja,  $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ .

Alguns valores de  $\mu_r$ :

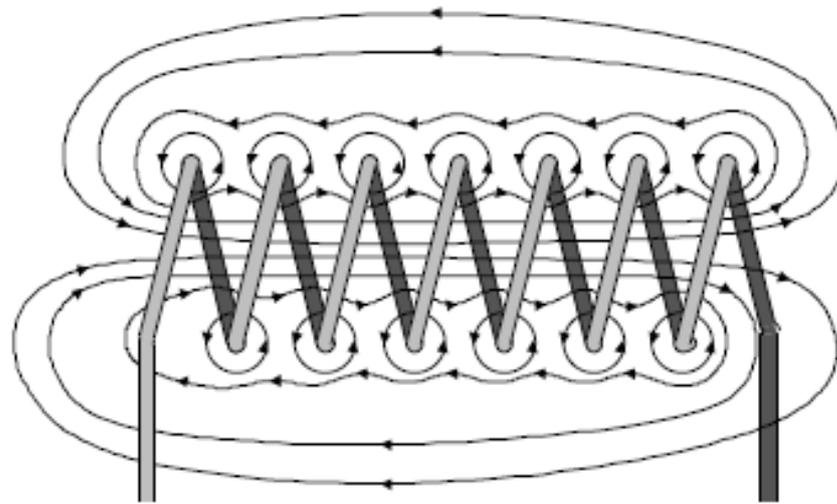
Elemento	$\mu_r$
Bismuto	0,99983
Ouro	0,99986
Cobre	0,999991
Prata	0,99998

Na Figura 1.7, é representado, a esquerda, um indutor apenas com a espira e a direita com um material ferromagnético, que é utilizado para facilitar o fluxo de campo magnético. Na Figura 1.8, são observadas as linhas de campo dos indutores.



Fonte: <[www.centelhas.com.br/biblioteca/indutores.pdf](http://www.centelhas.com.br/biblioteca/indutores.pdf)>

Figura 1.7. Estrutura dos Indutores



Ref.: <[www.centelhas.com.br/biblioteca/indutores.pdf](http://www.centelhas.com.br/biblioteca/indutores.pdf)>

Figura 1.8. Linhas de Campo do Indutor

### 1.3 Relação entre os campos

Cronologicamente, a relação entre campo elétrico e campo magnético foi desenvolvida com embasamento nos seguintes acontecimentos científicos:

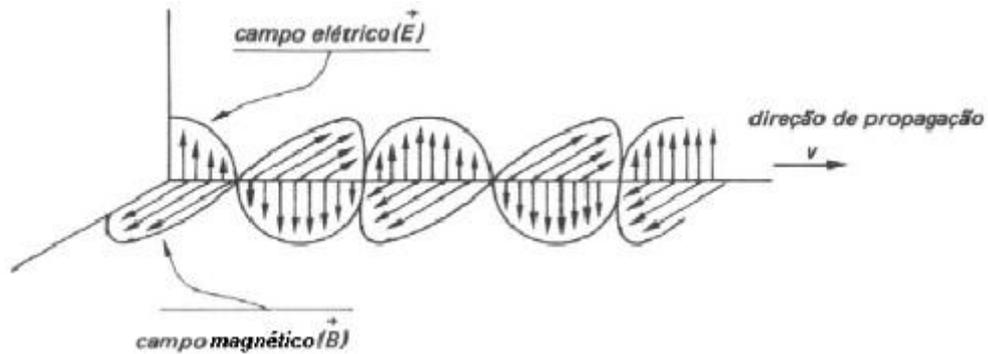
- 1801: André Marie Ampère descobre que a corrente elétrica produz campos magnéticos.
- 1831: Michael Faraday demonstra que os campos magnéticos q variam no tempo produzem campos elétricos.
- 1863: James Clerk Maxwell conclui que os campos elétricos que variam no tempo deveriam produzir campos magnéticos.

Através destes acontecimentos, o próprio Maxwell voltou seus estudos a experimentos que confirmaram sua teoria e, como fruto destes e com o auxílio da ferramenta chamada “cálculo vetorial”, quatro Leis regidas por equações foram fundamentadas. São elas:

- Lei de Gauss  $\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$  :
  - Relaciona o campo elétrico com suas cargas geradoras. Calcula o número de linhas de campo em uma superfície fechada, obtendo o número total de cargas.  
Através desta lei, observa-se que as linhas de campo elétrico começam nas cargas positivas e terminam nas negativas.
- Lei de Gauss para o Magnetismo  $\nabla \cdot \vec{B} = 0$  :
  - É apresentado o conceito de dipolos magnéticos, que são os geradores de campos magnéticos. Através desta equação, têm-se que os campos magnéticos não possuem início ou fim demarcados, existindo apenas a circulação do seu fluxo
- Lei de Faraday  $\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$  :
  - Descreve a maneira como a indução magnética induz ou cria um campo elétrico em um intervalo de variação de tempo. Este conceito é aplicado por exemplo, em geradores, nos quais são constituídos de um magneto em rotação (rotor), que cria um campo magnético variável no tempo, que assim gera um campo elétrico também variável no tempo, em um condutor próximo (estator).
- Lei de Ampère com a correção de Maxwell  $\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ 
  - Com a correção de Maxwell, a Lei de Ampère, que já citava que a corrente elétrica era a única geradora de campos magnéticos, é ampliada, recebendo o conceito de que os campos elétricos também são geradores de campos magnéticos.  
Através desta correção, foi permitida a existência de “ondas eletromagnéticas”.

Após a fundamentação destas Leis, Maxwell pôde então concluir que as ondas eletromagnéticas se moveriam ou propagariam de acordo com uma fonte variante do tempo. Assim, como demonstrado, os campos elétricos e magnéticos estão intimamente ligados sendo que, seus vetores são perpendiculares entre si no sentido de propagação, conforme a

mostra a Figura 1.9. A combinação dos vetores de campo elétrico e campo magnético ficaram conhecidos como campo eletromagnético.



Fonte: <<http://pt.scribd.com/doc/55313273/4/Leis-de-Maxwell>>

Figura 1.9. Campo Eletromagnético. Vetores dos campos elétrico e magnético tem seus vetores perpendiculares entre si.

Além dos fatos apresentados, Maxwell desenvolveu ainda a teoria da qual a luz é uma onda eletromagnética, e que todas as ondas eletromagnéticas se propagariam na velocidade da luz no ar livre ou vácuo. Este teorema, apesar de muito contestado na época, foi provado apenas após a sua morte (em 1879), através de uma série de experimentos brilhantes de Heinrich Hertz no ano de 1888.

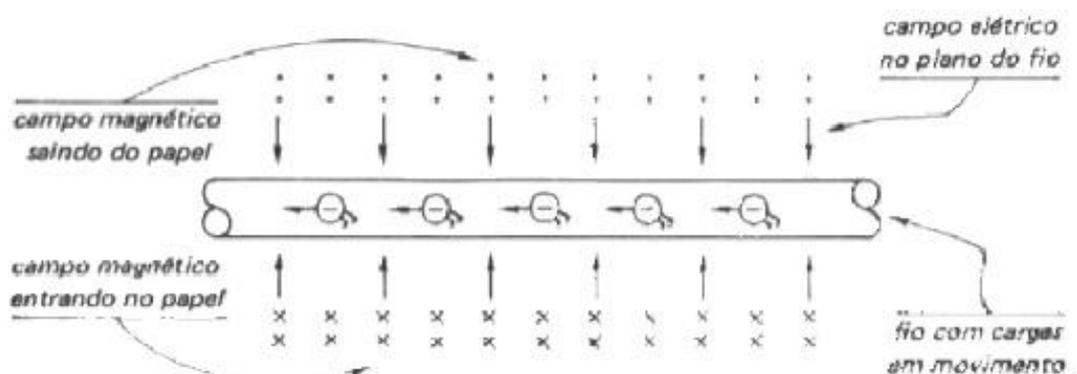
## 2. LINHAS DE TRANSMISSÃO

Segundo MARIANO [...] (2003), LTs são utilizadas com o intuito de levar energia ou um sinal, que pode estar associado a dados de informações, luz ou até mesmo calor, de um ponto a outro. De maneira geral, associam uma fonte a uma determinada carga ou conjunto de cargas, como exemplo um transmissor e uma antena receptora.

No capítulo anterior, viu-se que os campos eletromagnéticos são perpendiculares e possuem mesma direção de propagação. Da mesma maneira, o mesmo comportamento é observado em linhas de transmissão. Ondas transmitidas com estas características são chamadas de Transverso-Eletromagnéticas (TEM).

As linhas de transmissão podem ser classificadas como uniformes e não-uniformes, nas quais compreende-se uniforme a linha que mantém a geometria da seção transversal e as características elétricas e magnéticas ao longo de seu percurso. Existe também a classificação que diz respeito às perdas, onde as linhas sem perdas são aquelas em que as ondas eletromagnéticas não sofrem qualquer atenuação em sua propagação.

Segundo WENTWORTH [...] (2009), a propagação das ondas nas linhas de transmissão, varia conforme o material separa o par de condutores que as constituem, ou seja, seu  $\mu$  (permeabilidade) e  $\epsilon$  (permissividade) e, a condutividade do material, que determina a quantidade de corrente que flui nos condutores, sendo representada pela letra grega  $\sigma$  (sigma). O campo eletromagnético em uma guia de ondas é demonstrado conforme Figura 2.1.

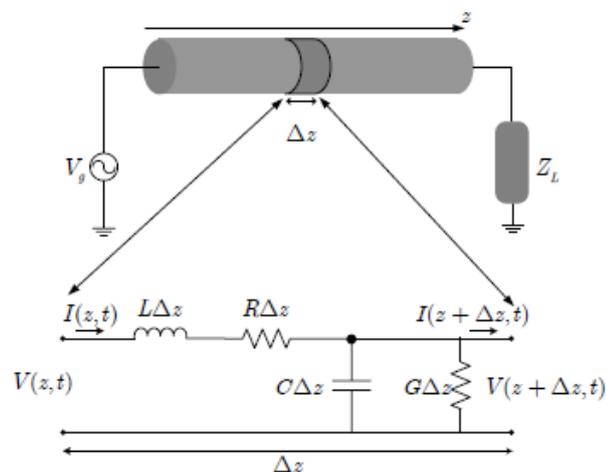


Fonte: Adaptado da apostila "LEIS DE MAXWELL" disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/55313273/4/Leis-de-Maxwell>>

Figura 2.1. Campo elétrico e Campo magnético em um condutor de acordo com o sentido da corrente.

### 2.1 Diagrama de uma linha de transmissão

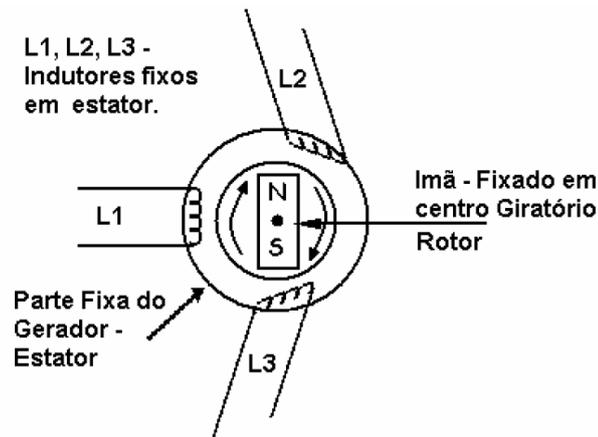
Segundo MARIANO [...] (2003), “Uma linha de transmissão possui duas extremidades e em cada uma delas dois terminais nos quais a energia é fornecida e recebida.”. Assim sendo pode-se observar, através da Figura 2.2, um segmento infinitesimal  $dX$  de uma linha de transmissão, onde  $I$  é a corrente que flui pelo condutor,  $V$  a tensão (de Entrada e de Saída), a admitância (paralelo entre Capacitância  $C$  e Condutância  $G$ ) que fornece energia reativa e a impedância  $Z$  (Série do Indutor  $L$  e a resistência  $R$ ), em série com o circuito, que consome a energia reativa e é responsável pela queda de tensão e problemas de estabilidade na transmissão a longas distâncias.



Fonte: Apostila Teoria das Linhas de Transmissão (2005)  
 Figura 2.2 Estrutura da Linha de Transmissão

## 2.2 Linhas trifásicas

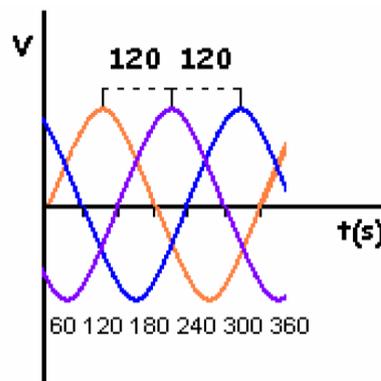
A geração de energia elétrica é realizada através de um dispositivo mecânico e a transmissão é feita por três fases, conforme ilustrado pela Figura 2.3. na qual um gerador é representado com 3 indutores fixos e carcaças específicas, representando as 3 fases elétricas e um ímã fixo que gira através de estímulo externo.



Fonte: Artigo Científico “Sistemas de Distribuição em Média Tensão”

Figura 2.3 Gerador trifásico

Os indutores dividem um espaço de  $360^\circ$ , sendo fixados a  $120^\circ$  entre eles. Assim, as tensões e correntes geradas a partir deste sistema são defasadas de  $120^\circ$  uma da outra como mostra a Figura 2.4. A energia produzida por este meio ondulatório, gera uma tensão alternada, a qual é expressa por uma onda senoidal, com frequência fixa e amplitude variando conforme valores estabelecidos na baixa, média e alta tensão.



Fonte: Artigo Científico “Sistemas de Distribuição em Média Tensão”

Figura 2.4 Sistema trifásico. Defasagem entre tensões.

## 2.2.1 Classes de tensão em linhas trifásicas

Segundo ABNT [...] (2000), conforme as normas NBR 5456 – Eletricidade Geral – Terminologia e NBR 5460 – Sistemas elétricos de potência – Terminologia, o transporte da energia desde as usinas geradoras, passando pelos postos de transformação, até a

interligação com outros sistemas através de linhas de transmissão em alta tensão, tem classes de tensão divididas da seguinte maneira:

Linhas de Transmissão: classe de tensão igual ou maior que 230kV, sendo as mais típicas as tensões de 69kV, 138kV, 345kV e 765kV;

Linhas de Subtransmissão: classe de tensão abaixo de 230kV.

O transporte de energia das subestações transformadoras de distribuição é feito por circuitos que operam em média tensão. No Brasil, as classes de tensão típicas em média tensão são: 11kV, 13,8kV, 21kV e 34,5kV. Circuitos de baixa tensão possuem as seguintes tensões mais usuais: 110V, 220V, 380V e 440V.

## **2.3 Interferências eletromagnéticas devido às LT's**

De acordo com ALVES [...] (1996), existe uma gama muito extensa de problemas relacionados a linhas de transmissão no que diz respeito a interferências eletromagnéticas devido às suas características físicas e geométricas.

As interferências causadas por linhas de transmissão podem ser apresentadas da seguinte maneira:

### Interferência em baixas frequências (até 60Hz):

Está relacionado com a importância da integridade física dos seres vivos e a proteção dos equipamentos agregados ao sistema. Os principais tipos de interferência em baixas frequências são: Acoplamento magnético (indutivo), Acoplamento resistivo e Acoplamento eletrostático (capacitivo).

### Interferência em alta frequência (acima de 60Hz):

O estudo desta modalidade de interferência é de suma importância, pois visa a qualidade dos serviços prestados pelo linha de transmissão, ou seja, visa observar a confiabilidade do tráfego de dados ou de potência. Os tipos de interferência em alta frequência que mais ocorrem são: RI, TVI e Ruído audível.

### 2.3.1 Acoplamento eletromagnético entre LT e outros circuitos

Devido ao acoplamento eletromagnético existente entre linhas de transmissão e demais linhas, tensões são induzidas nestas durante seu funcionamento normal ou durante curto-circuitos. Estas tensões podem atingir níveis críticos, criando ruídos e poluição nas linhas, danificando equipamentos ou mesmo causando o isolamento delas, ou seja, impedindo que haja transmissão na linha afetada.

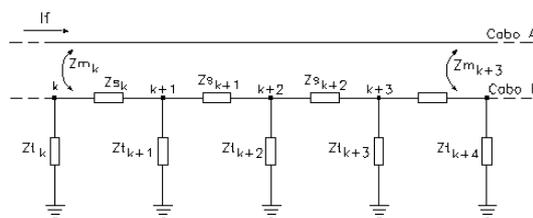
Os acoplamentos eletromagnéticos geralmente variam consideravelmente de intensidade ao longo do percurso da linha, pelo fato de haverem eventuais aproximações a outras linhas ou cruzamento entre eles, ou a variação da resistividade do solo. Desta maneira, o cálculo as tensões e correntes induzidas nas proximidades das LT's não é simples.

A metodologia dos cálculos consiste em:

1. Determinar as forças eletromotrizes (fem's) em um dos circuitos através das correntes e tensões dos outros circuitos do sistema;
2. Transformar as fontes de tensão em fontes de corrente através da aplicação do Teorema de Norton;
3. Resolver o sistema linear descrito em função das fontes de corrente e das impedâncias do circuito;
4. Calcular as correntes que fluem no circuito;
5. Repetir este processo em cada um dos circuitos até que os resultados sejam alcançados.

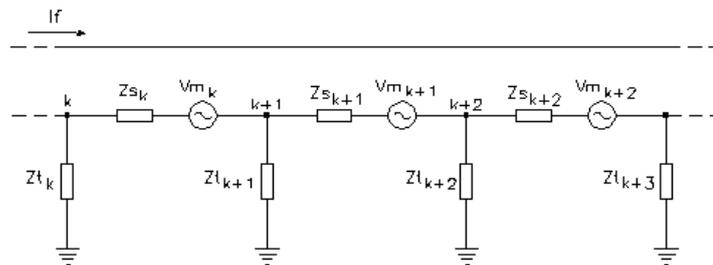
São 4 os tipos de acoplamento entre linhas de transmissão existentes, são eles:

**Acoplamento Magnético:** induz uma tensão longitudinal em uma linha sob a influência da linha principal. Assim sendo, se duas linhas são colocadas próximas, conforme Figura 2.5, onde o cabo A conduz uma corrente e B, multiaterrado, sofre influência de A, devido ao acoplamento magnético entre eles, será induzida uma tensão longitudinal representado pela Figura 2.6, onde  $Z_{mk}$  é a impedância mútua entre os cabos A e B e  $I_f$  a corrente indutora.  $V_{mk}$  é a tensão longitudinal induzida.



Fonte: Adaptado da Apostila "Interferência Eletromagnética devido às linhas de Transmissão (1996).

Figura 2.5. Linhas A e B – Acoplamento Magnético

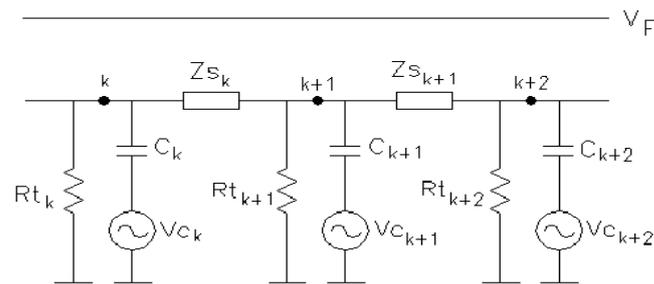


Fonte: Adaptado da Apostila “Interferência Eletromagnética devido às linhas de Transmissão (1996).

Figura 2.6. Linhas A e B com tensão induzida– Acoplamento Magnético

**Acoplamento Eletrostático ou Capacitivo:** considerando a mesma situação anterior e supondo que existe uma carga no final da linha A, pelo acoplamento eletrostático, em cada ponto  $k$  do cabo B é induzida uma fem transversal a ele.

Na Figura 2.7, a impedância do cabo B para terra foi dividida em uma resistência  $R_{tk}$  em paralelo com uma capacitância  $C_k$ .  $R_{tk}$  é a resistência de aterramento no cabo B em cada ponto  $k$ . A capacitância  $C_k$  é a soma da metade da capacitância do cabo para a terra nos ramos  $k$  e  $k-1$ .

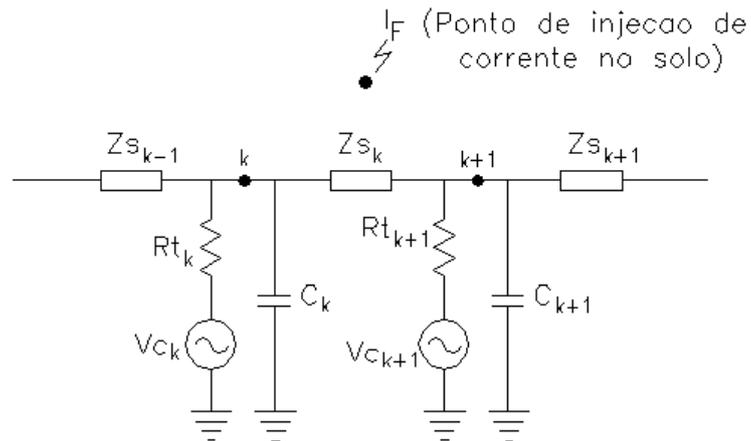


Fonte: Adaptado da Apostila “Interferência Eletromagnética devido às linhas de Transmissão (1996).

Figura 2.7. Linhas A e B – Acoplamento Eletrostático

**Acoplamento Resistivo:** Ocorre quando existem pontos de aterramento próximos aos pontos de injeção de corrente do circuito. Quando um sistema possui esta característica, estará sujeito a circulação de altas correntes indesejadas, pois a injeção de corrente no solo causa elevação de potencial em seus pontos em relação ao terra remoto. Isto pode ocorrer, por exemplo, durante um curto-circuito.

Considerando o mesmo sistema citado, com o cabo multiterrado B, ao se injetar uma corrente  $I_f$  em um ponto do solo, um ponto  $k$  sofrerá elevação de potencial, conforme demonstra a Figura 2.8.

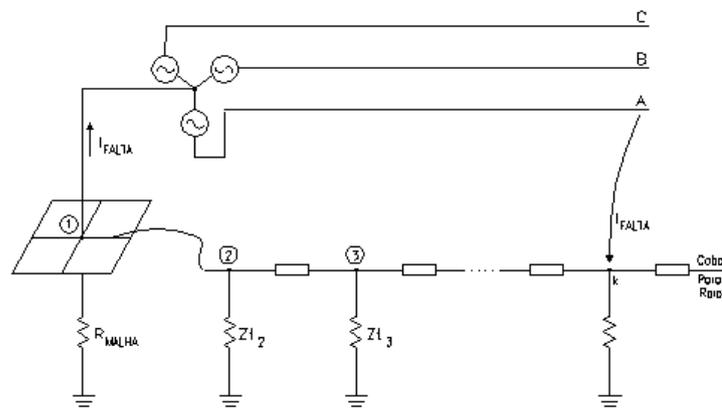


Fonte: Adaptado da Apostila “Interferência Eletromagnética devido às linhas de Transmissão (1996).

Figura 2.8. Linhas A e B – Acoplamento Resistivo

**Acoplamento Metálico:** Ocorre quando existe transferência de correntes por meio de contato metálico, como por exemplo, durante um curto-circuito entre cabos trifásicos e um pára-raios de uma LT por meio de uma torre metálica.

Este exemplo é demonstrado na Figura 2.9, onde  $I_{FALTA}$  é a corrente decorrente do curto-circuito.



Fonte: Adaptado da Apostila “Interferência Eletromagnética devido às linhas de Transmissão (1996).

Figura 2.9. Curto-Circuito entre linha trifásica e para-raios – Acoplamento Metálico

## 2.3.2 Campo eletromagnético e a segurança do ser humano

Segundo ABNT [...] (2002), de acordo com a norma NBR 5464 – Interferências eletromagnéticas, os níveis para referência para campos elétricos e magnéticos precisam ser considerados de maneira separada e não em conjunto, pois para fins de proteção, as correntes induzidas por ambos os campos não são aditivas.

A OMS (Organização Mundial de Saúde), recomenda, para a exposição ambiental, ou seja, para o público geral a campos elétricos e magnéticos variáveis no tempo na frequência de 50 e 60 Hz os seguintes limites:

Campo Elétrico = 4,20 kV/m e Campo Magnético = 0,83 G

Em relação ao nível de corrente de contato e corrente induzida, até a frequência de 2,5kHz, o nível de referência de contato para exposição ao público em geral é de 0,5 mA. Este valor desta norma NBR, corresponde à metade do estabelecido pela OMS, tendo em vista que os limiares para as correntes de contato que produzem respostas biológicas em mulheres adultas e crianças correspondem a aproximadamente dois terços e metade respectivamente dos limiares para homens adultos. Assim, foi padronizado um valor médio de tolerância.

## **3. PAINÉIS ELÉTRICOS**

Segundo Especificações [...] (2004), o termo painel elétrico é um resumo que diz respeito a compartimentos que abrigam combinações de equipamentos relacionados à energia elétrica, como por exemplo controle, distribuição, manobra, medição, sinalização, proteção, regulação, etc., completamente montados, com suas interconexões e estruturas internas elétricas e mecânicas.

Assim, com base nesta definição, podemos encontrar, como aplicações de painéis de baixa tensão os painéis de distribuição e sub-distribuição, CCM's (Centro de Controle de Motores), painéis de controle e painéis de acionamentos/drives, que são as mais comuns no meio industrial e, na média tensão com os cubículos de proteção e seccionamento.

### **3.1 Painéis de baixa tensão**

Segundo LINHAS [...] (2009), compreende-se baixa tensão, conforme norma ABNT NBR 5410:2004 em 6.1.5.2, os circuitos alimentados sob tensão nominal igual ou inferior a 1000V em corrente alternada, com frequências inferiores a 400Hz ou aqueles alimentados com até 1.500V em corrente contínua.

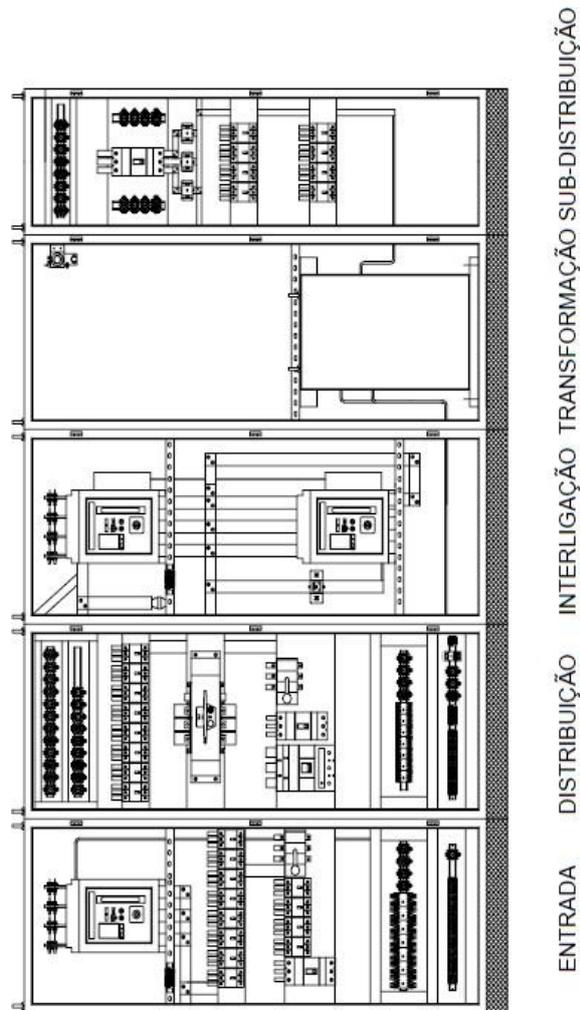
#### **3.1.1 Painéis de distribuição e sub-distribuição**

São painéis que acomodam componentes de proteção, seccionamento e manobra elétrica. As aplicações vão desde a entrada de energia residencial até colunas de distribuição elétrica de grandes indústrias, que ocupam grande espaço físico.

Em grandes plantas industriais, é comum encontrarmos vários níveis de painéis de distribuição. Num primeiro plano encontramos os painéis gerais de baixa tensão, que são instalados em sequência a entrada de energia fornecida pela concessionária em baixa tensão, ou após os transformadores abaixadores quando a indústria recebe fornecimento em média tensão.

Nesta sub-divisão de painéis, é comum encontrar, em uma mesma estrutura, diversas funções, como por exemplo, uma entrada, interligação e chaveamento gerador/concessionária e saídas, como mostra a Figura 3.1, na qual, a primeira coluna a esquerda, possui o dispositivo que recebe a alimentação da rede e tem o papel de proteção e manobra (disjuntor), ainda na primeira coluna, logo abaixo e na coluna seguinte, estão dispositivos menores, que são responsáveis pela proteção e definição dos circuitos

subsequentes de distribuição, a terceira coluna detalha dois disjuntores maiores, o superior é a proteção de um gerador para suprir uma eventual falta de energia e o segundo, protege o transformador de potencial abaixador da quarta coluna, que alimenta os circuitos de emergência.



Fonte: Adaptado do Catálogo Técnico – “Especificações de Painéis LAVILL (SIEMENS)” (2004)

Figura 3.1. Painel elétrico de entrada de baixa tensão.

### 3.1.1.1 Bancos de capacitores

Também no grupo de distribuição, muitas vezes encontram-se os painéis para correção de fator de potência, nos quais podem aparecer acoplados ao quadro geral ou isolados em outros pontos da fábrica. Esse tipo de painel é composto de um conjunto de capacitores, com equipamentos agregados de proteção e manobra, um controlador automático e chaves para seleção manual.

O F.P. ( $\cos \phi$ ) é o que determina a potência ativa, que será transformada em trabalho útil. A quantidade e o tipo de cargas resistivas (com valores de F.P. próximos a 1)

ou indutivas (com valores de F.P. da ordem de 0,65 e 0,7), é o que determina o fator de potência de uma fábrica.

O F.P. resulta no defasamento entre tensão e corrente e o defasamento indutivo é contrário ao capacitivo. Assim, se o valor do F.P. for indutivo e baixo, pode-se compensá-lo, sobrepondo a ele um defasamento capacitivo.

Pela atual legislação da área de energia estabelecida pela ANEEL, o valor mínimo de fator de potência é 0,92 capacitivo durante a madrugada e 0,92 indutivo durante as outras 18 horas, com o descumpridor estando sujeito à multa. Assim, em uma empresa na qual existem muitos motores (carga indutiva), é necessário a aplicação de bancos de capacitores para a correção do fator de potência com o intuito de deixar o consumo elétrico da empresa nos moldes da lei.

### **3.1.2 CCM – Centro de controle de motores**

CCM's são painéis usados para acomodar sistemas para proteção, seccionamento, partida e manobra de cargas. Apesar de aproximadamente 85% das cargas industriais serem motores (motivo pelo qual existe o nome CCM), o termo carga é muito abrangente, podendo significar qualquer equipamento que consuma energia elétrica, como resistores de aquecimento, estufas, etc.

Este tipo de estrutura, normalmente apresentada em colunas dotadas de gavetas (extraíveis ou não) e é aplicada para as seguintes situações:

- Quantidade numerosa de cargas a serem comandadas;
- É exigida extrema segurança e continuidade de operação;
- É necessário o acesso de operadores não qualificados, necessitando alto nível de segurança da integridade física.

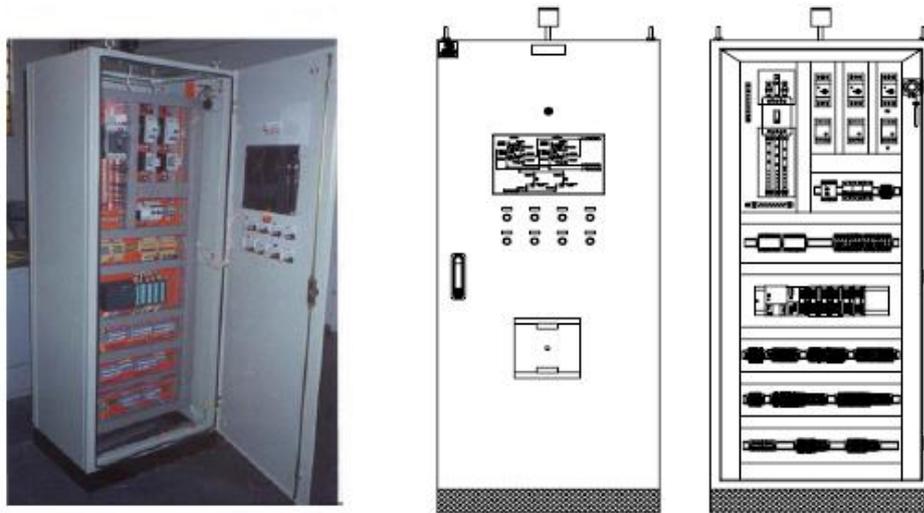
### **2.1.3 Painéis de controle**

Os painéis de controle possuem conjuntos de equipamentos de controle digital sofisticados (CLPs – Controles lógicos Programáveis e IHMs – Interfaces homem-máquina) ou sistemas de menor complexidade, com relés, contadores e disjuntores, intertravando processos ou aplicações. São utilizados em para processos de automação de acionamento, podendo conter lógicas de funcionamento de toda uma linha de produção.

Diferentemente dos CCM's, os painéis de controle tem a função de coordenar todo um sistema, cedendo permissões de atuação de máquinas e inter-travamentos de

máquinas, atuando de forma independente, sendo dotado também de acionamentos e proteções de motores ou de maneira conjunta com um painéis próprios para o acionamento.

Como controlam sistemas, dependem de sinais externos para o funcionamento, enviando sinais para o acionamento de válvulas solenóides e motores e recebendo estímulos de equipamentos como fluxostatos, pressostatos e termostatos. Para tanto, muitas vezes, além dos botões de comando na porta do painel, podem haver botoeiras externas, que são utilizadas para operação de máquinas distantes dos painéis.



Fonte: Adaptado do Catálogo Técnico – “Especificações de Painéis LAVILL (SIEMENS)” (2004)

Figura 3.2. Painel de Controle (PLC)

### 3.1.4 Painéis de Acionamento - Drives

São conjuntos destinados exclusivamente ao acionamento de motores. Geralmente abrigam em seu interior componentes elétricos destinados a proteção e controle de partida dos motores, que atuam de forma independente.

Para alguns casos, são utilizados os chamados drives, que são equipamentos utilizados para controle de velocidade de motores (inversores e conversores de frequência) ou apenas suavização da partida dos mesmos (soft-start). Apesar de muito úteis, trabalham com altas frequências internas e são responsáveis pela emissão de ondas harmônicas na rede industrial. Deve-se também seguir requisitos essenciais de instalação afim de evitar esta poluição eletromagnética, como a utilização de filtros de entrada e saída e correta especificação do produto e de suas proteções.

Assim como nos painéis de controle, os painéis de acionamento também podem receber estímulos de fora, podendo ter botoeiras ou mesmo mesas de controle em locais estratégicos da fábrica, que comandam e supervisionam as máquinas.



Fonte: Adaptado do Catálogo Técnico – “Especificações de Painéis LAVILL (SIEMENS)” (2004)

Figura 3.3. Painel com Inversor de Frequência.

## 3.2 Motores elétricos

Segundo ULIANA [...] (2006), motores são máquinas que convertem energia elétrica em energia mecânica, possuem construção simples, versátil e não poluente. Sua finalidade básica é o acionamento de máquinas, equipamentos mecânicos, eletrodomésticos, entre outros. Os tipos mais comuns de motores são:

- Motores de corrente contínua:

De custo elevado, necessita de uma fonte de corrente contínua ou um conversor CA/CC para o seu funcionamento. Pode funcionar com velocidade ajustável e é aplicável a controles de grande flexibilidade e precisão. Devido a esta particularidade, devem ser utilizados apenas em casos especiais, que compensem seu custo elevado de fornecimento e instalação.

- Motores de Corrente Alternada:

Devido a rede elétrica do Brasil ser distribuída, normalmente, em corrente alternada, são os motores mais utilizados. Os principais tipos são:

- Motor Síncrono: Possui velocidade fixa e por esta razão, é aplicado quando a velocidade solicitada é invariável. É utilizado somente para

grandes potências, devido ao fato de ter alto custo para potências menores.

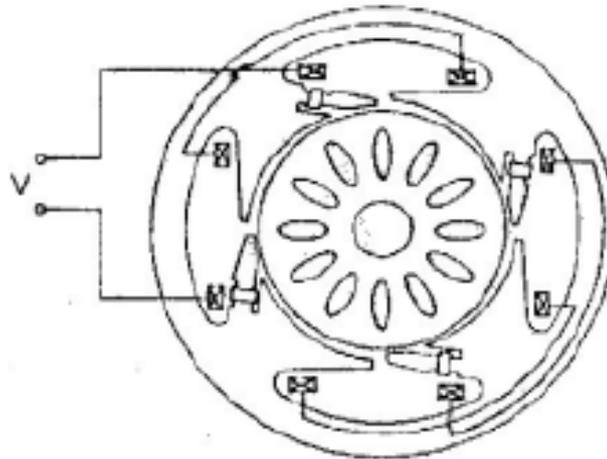
- Motor de Indução (Assíncrono): De maior simplicidade, robustez e custo inferior, é o tipo de motor mais encontrado. Funciona normalmente com velocidade constante, que varia de acordo com a carga mecânica aplicada ao eixo. Atualmente é possível controlar a velocidade dos motores de indução com o auxílio dos inversores de frequência.

Para este estudo, será limitada a explicação apenas do tipo de motor aplicado no sistema a ser observado. O motor em questão é também o mais presente na indústria nos dias de hoje, o motor de indução trifásico.

### **3.2.1 Motor de indução trifásico**

De acordo com ULIANA [...] (2006), os motores assíncronos são constituídos basicamente por um circuito magnético estático (estator), formado por chapas ferromagnéticas empilhadas e isoladas entre si; bobinas de cobre localizadas em cavidades abertas no estator e alimentadas pela rede; um componente magnético móvel (rotor), no qual se encontra um enrolamento ou um conjunto de condutores paralelos onde são induzidas correntes provocadas pela corrente das bobinas do estator.

A partir do momento em que os enrolamentos do estator são sujeitos a uma corrente, um campo magnético é gerado em seu interior. Conseqüentemente, uma força eletromotriz é induzida no rotor devido a este fluxo magnético. Esta força induzida, por sua vez, gera uma corrente no rotor, que tende a opor-se à causa que lhe deu origem, criando assim um movimento giratório. Na Figura 3.4. é representado um motor elétrico de indução, com uma tensão “V” aplicada aos enrolamentos do estator e o rotor (material que se encontra em torno do eixo no centro do motor).



Fonte: Adaptado da Apostila Técnica – “Comando Elétrico e Motores Elétricos” (2006)

Figura 3.4. Motor de Indução

### 3.3 Partidas de motores

De acordo com PARTIDA [...] (2003), durante a partida de um motor de indução trifásico, a corrente absorvida da rede é muito elevada, podendo atingir, em alguns casos, até 8 vezes a corrente nominal do motor. Desta forma, existem algumas maneiras para as partidas destes motores, podendo visar, ou não, a redução de energia gasta na partida, uma vez que, segundo POWERFLEX [...] (2006), na indústria, o gasto energético correspondente a motores elétricos chegam a 51%, fazendo com que seja necessário reduzir ao máximo a potência consumida e otimizar os meios de controle de processo.

Segundo SIEMENS [...] (2003), para realizar uma melhor otimização da energia dispersa durante uma partida de um motor, deve-se aumentar a impedância equivalente ou diminuir a tensão de alimentação. São quatro os métodos disponíveis para partidas de motores, sendo eles:

- Partida Direta
- Estrela-Triângulo
- Compensadora com auto-transformador
- Suave (soft-starter) com eletrônica de potência

Nos dias atuais, porém, o método de Compensadora com auto-transformador já é mais raro e os sistemas com partidas por inversores de frequência surgiram nos últimos anos como mais uma opção.

Para definir o método de partida, utiliza-se principalmente os seguintes critérios:

- Característica da máquina a ser acionada (potência, tensão e aplicação no sistema)

- Confiabilidade de serviço
- Distância da fonte de alimentação, devido a condição de queda de tensão
- Os custos relativos entre o motor e sistema de partida
- Perturbações induzidas na rede de alimentação, no caso da poluição da rede devido a ondas harmônicas
- Qualidade de partida: em certos tipos de equipamentos, não pode haver os chamados trancos, que são variações bruscas na alimentação do motor

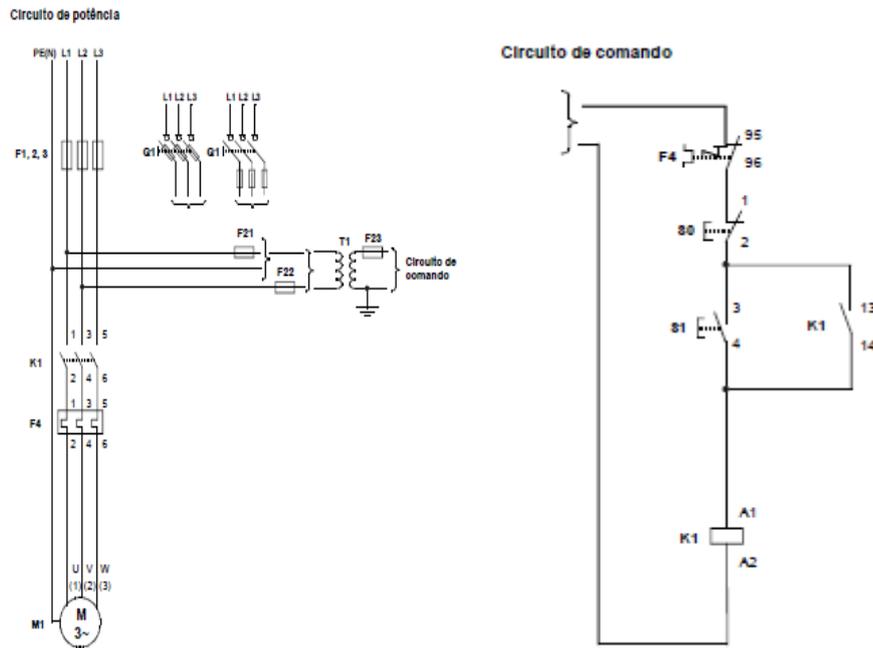
### 3.3.1. Partida direta

Segundo SIEMENS [...] (2003), o conceito de partida direta está atrelado com a alimentação do motor com sua tensão nominal. Realizando isso, é solicitada a fonte, uma corrente de 6 a 8 vezes superior a corrente nominal do motor, o que pode causar queda de tensão na alimentação que seja para a os consumidores da mesma instalação, ou mesmo na própria alimentação do painel.

De acordo com a norma brasileira NBR-5410, existe um limite para as partidas diretas a potência de 5cv.

Este tipo de partida é constituído de três componentes básicos, sendo eles: fusível (para proteção contra curto-circuitos), contator (dispositivo de manobra de operação por energização de uma bobina) e relé-térmico (para proteção térmica do motor). No lugar do fusível, pode-se aplicar disjuntor ou então disjuntor-motor, que já possui proteção térmica e isenta a instalação de relé-térmico.

Dividida em duas partes, a Figura 3.5. retrata o circuito de potência, mostrando os componentes de potência dispostos no projeto elétrico, no qual os fusíveis estão representados por F1,2,3, K1 é o contator e F4 o relé térmico e o circuito de comando, onde F4 é o contato de proteção do relé térmico, S0 e S1 os botões desliga e liga respectivamente K1 a bobina do contator e o contato de selo. Estas ilustrações demonstram a maneira como o contator é liberado para atuar por meio de uma botoeira liga-desliga com um contato de selo (que mantém o contator atuando).



Fonte: Adaptado do Catálogo Técnico – “MÉTODOS DE PARTIDA (SIEMENS)” (2008, V2)

Figura 3.5. Partida direta

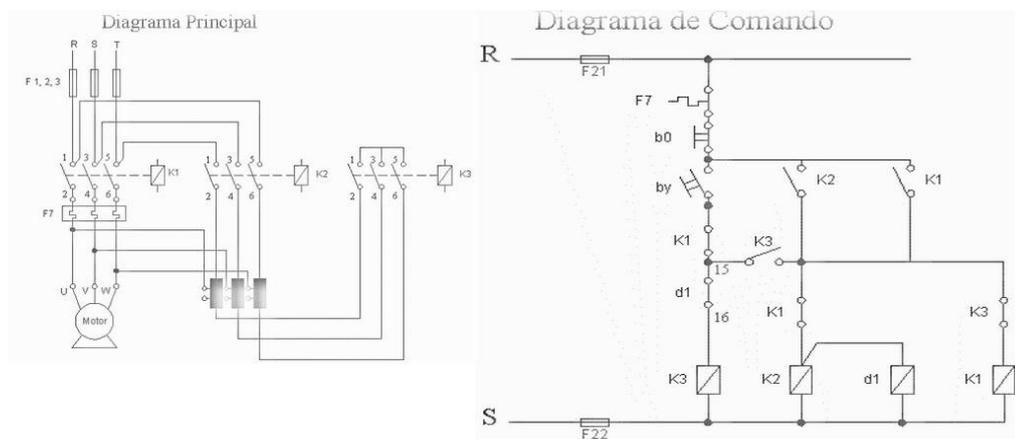
### 3.3.2 Partida Estrêla-Triângulo

Segundo SCHMELCHEN [...] (1988), o princípio de funcionamento da partida estrela-triângulo é baseado em um acionamento de motor com dupla tensão, podendo ser 220/380V, 380/660V ou 440/760V. O motor é ligado inicialmente em estrela até que alcance uma velocidade próxima de regime, quando então, através de um relé temporizado, a ligação é desfeita e o motor é ligado em triângulo.

Durante a partida em estrela, o conjugado e a corrente de partida ficam reduzidos a 1/3 de seus valores nominais. Assim, o motor só poderá partir através de uma chave estrela-triângulo quando o conjugado da ligação estrela for superior ao conjugado da carga do eixo. Devido ao baixo conjugado de partida, associado ao motor, as chaves estrela-triângulo são mais adequadas para motores com partida em vazio.

Segundo WEG [...] (1990), as principais vantagens deste tipo de ligação são: Redução dos custos com energia elétrica, que se dá em função da corrente de partida ser reduzida a 1/3 da nominal e dimensões reduzidas de componentes em relação a instalação de soft-starters e inversores. Porém, segundo PARTIDA [...] (2003), na passagem de uma posição para outra, ocorre uma elevação brusca do conjugado, produzindo um tranco no eixo da máquina. Assim, esta operação acaba por diminuir a vida útil da máquina.

A Figura 3.6., dividida em duas partes, mostra primeiro o modelo do diagrama de força da partida estrela-triângulo, na qual mostra o os componentes dispostos no projeto e na direita o acionamento deste tipo de partida.



Fonte: Adaptado do site COMANDOS elétricos. (2010)

Figura 3.6. Partida Estrela-Triângulo

### 3.3.3 Partida soft-starter

Segundo SIEMENS [...] (2003), tanto partidas estrela-triângulo como partidas com chaves compensadoras (método não mais utilizado, no qual é empregado um transformador com vários enrolamentos, utilizados para partir motores utilizando tensões graduais em etapas), provocam solavancos ao executarem a passagem das tensões reduzidas até a tensão nominal.

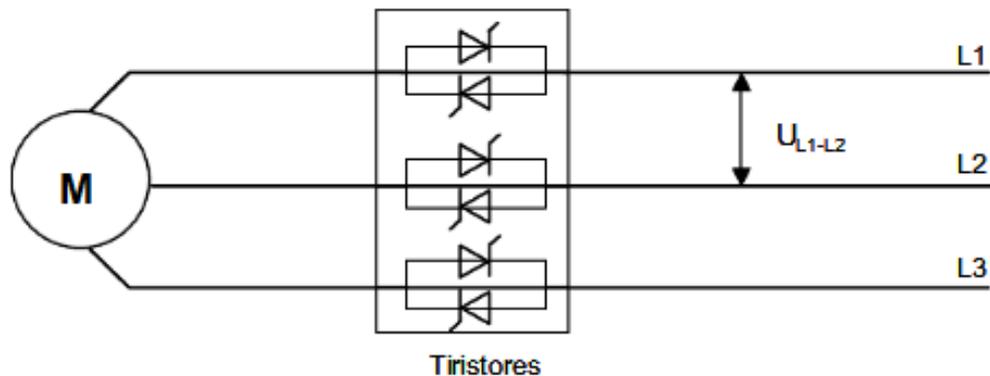
Como, em muitas aplicações, como por exemplo ventiladores, bombas e compressores de grande porte, máquinas de grande momento de inércia, entre outros, o motor não aguenta fisicamente essas variações de tensão e acabam exigindo acionamentos mais suaves, pode-se usar, para estes casos, a partida suave com eletrônica de potência (soft-starter).

O soft-starter é um dispositivo de manobra microprocessado, que tem como função a partida e parada suaves de motores assíncronos trifásicos de potências elevadas, onde se deseja eliminar picos de corrente na partida e altos conjugados de aceleração dos mesmos.

Este método de partida é realizado através do escalonamento de tensão de alimentação fornecida a cada instante, fornecendo o controle da potência fornecida, podendo ser ajustado conforme necessidade, até chegar ao valor de tensão pleno. Este procedimento é executado através de um par de tiristores por fase, ligados em anti-paralelo (paralelo com as polaridades invertidas), que atuam em função de um programa antes estipulado.

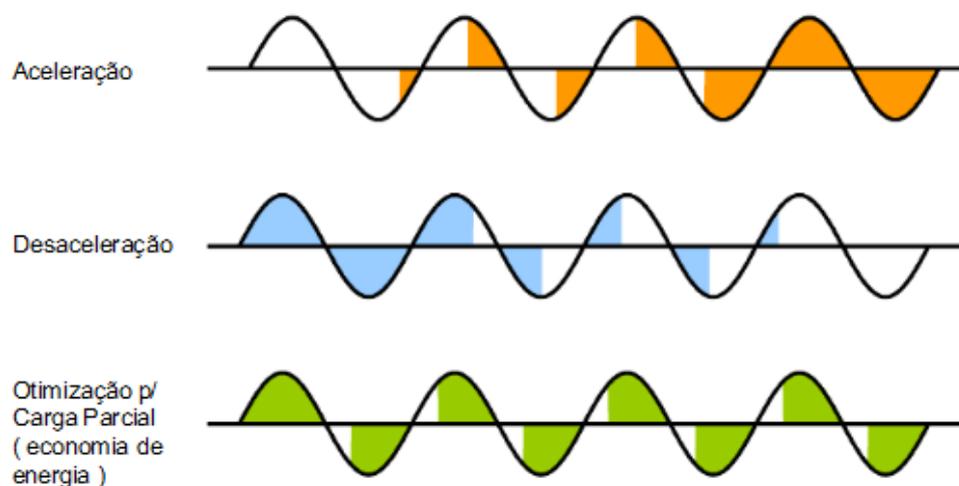
Devido a esta aplicação, pode-se partir o motor do estado de repouso até a rotação nominal, através de uma série de degraus imperceptíveis, cuja variação atende à própria curva de carga, sendo que, o que é realizado para a aceleração, também é aplicável no sentido inverso, a desaceleração.

Através das figuras a seguir, têm-se o detalhamento do procedimento, onde, na Figura 3.7., é mostrada a ligação anti-paralelo dos tiristores e a ligação ao motor, e na Figura 3.8., o processo de degraus em relação a tensão de alimentação do motor.



Fonte: Adaptado do catálogo técnico da SIEMENS PARTIDAS de motores elétricos. (2003). Figura 3.7. Partida Soft-Starter/Composição soft-starter

#### Variação de tensão no motor



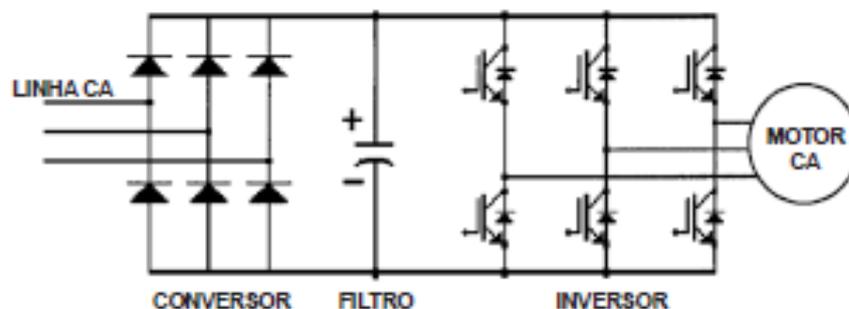
Fonte: Adaptado do catálogo técnico da SIEMENS PARTIDAS de motores elétricos. (2003).

Figura 3.8. Variação da Tensão de Alimentação na partida com Soft-Starter

### 3.3.4 Partida com inversor de frequência

De acordo com LUKITSCH [...] (2007), o inversor de frequência (ou conversor de frequência de acordo com alguns fabricantes), que é o componente principal desta modalidade de partida de motores, funciona da seguinte maneira: a tensão da linha CA é convertida em CC, que por sua vez é convertida em uma CC pulsada, cujo valor RMS simula uma tensão CA. Normalmente, a frequência de saída desta tensão CA varia de 0 até a frequência da linha de entrada CA. Em algumas aplicações, a frequência pode ultrapassar a frequência da linha.

O inversor mais comum produzido é aquele que utiliza a modulação por largura de pulso para criar uma onda de saída. Os componentes ativos usados nos inversores são diodos e transistores. Estes inversores têm três seções diferentes do seu circuito de alimentação, conforme ilustrado na Figura 3.9. A primeira seção usa uma ponte de SCR's de onda completa para converter CA em CC. Um capacitor é utilizado na segunda seção para filtrar o sinal, tornando-o estável. Na terceira seção é utilizada uma ponte de transistores para fornecer ao motor uma tensão CC com largura modelada por pulso (PWM).



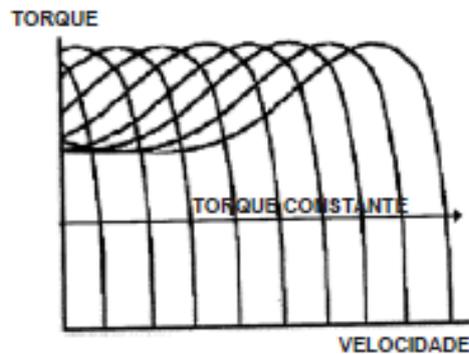
Fonte: Adaptado do catálogo técnico da ALLEN-BRADLEY COMPANY. (2007).

Figura 3.9. Diagrama de um inversor típico

O usuário pode programar a saída de frequência do inversor através da seção de controle ou lógica. Durante a aceleração, a frequência pode variar desde o mínimo ou 0 até a velocidade comandada, podendo inclusive pular determinadas frequências que possam causar ressonância mecânica, ou seja vibrações mecânicas geradas por influência de determinadas frequências (frequência de ressonância), que podem afetar tanto a integridade como o rendimento do motor.

A tensão RMS efetiva fornecida ao motor é dependente da frequência de saída fundamental que a ponte inversora está comandando. Isto leva ao termo “inversor volts/hertz”, que fornece o torque constante enquanto o motor acelera.

Na Figura 3.10, é ilustrado um gráfico com uma série de curvas de torque em função da velocidade. A linha de torque constante é o ponto de plena carga em um ponto das curvas que representa as curvas de torque em função da velocidade do motor de 0 a velocidade nominal.



Fonte: Adaptado do catálogo técnico da ALLEN-BRADLEY COMPANY. (2007).

Figura 3.10. Curvas de Torque de Velocidade do Inversor'

### 3.5 Painéis de média tensão (MT)

Conforme LINHAS [...] (2009), média tensão está associada a redes de cujas tensões estão entre 1.000V e 36,2kV, de acordo com a norma ABNT NBR 14039:2003 em 6.2. Segundo a ANEEL, esta norma aplica-se a partir de instalações alimentadas pelo concessionário, correspondente ao ponto de entrega definido através da legislação vigente.

Os painéis desta modalidade são instalados quando a empresa contratante de energia solicita a média tensão para a concessionária. Para tanto, uma série de requisitos no que dizem respeito a proteção e seccionamento de média tensão são necessários. São denominados cubículos de M.T. ou CMC's (Conjuntos de Manobra e Controle em M.T.) e são constituídos geralmente por uma coluna de entrada com disjuntor e relés de proteção e uma chave de seccionamento da média tensão e uma coluna para abrigar um transformador abaixador que alimenta a fábrica em B.T.

A figura 3.11 mostra um exemplo de painel de média tensão, com o cubículo da esquerda como a entrada e proteção da média tensão, seguido do transformador abaixador e os circuitos subsequentes nas colunas seguintes, em baixa tensão, que alimentam a fábrica.



Fonte: Site da empresa Focking.

Figura 3.11. Cubículo de Média Tensão

### 3.5 Símbolos literais

Segundo ESPECIFICAÇÕES [...] (2004), para a identificação de componentes em esquemas elétricos de painéis, símbolos literais foram adotados e padronizados pela IEC 113.2 e NBR 5280, conforme Tabela 3.1

Tabela 3.1

Símbolo	Componente	Exemplos
A	Conjuntos e subconjuntos	Equip. laser e maser. Combinações diversas
B	Transdutores	Sensores termoeletricos, células fotoelétricas, transdutores a cristal, microfones fonocaptadores, gravadores de disco
C	Capacitores	
D	Elementos binários, dispositivos de temporização, dispositivos de memória	Elementos combinados, mono e bi-estáveis, registradores, gravadores de fita ou de disco
E	Componentes diversos	Dispositivos de iluminação, de aquecimento, etc.
F	Dispositivos de proteção	Fusíveis, pára-raios, disparadores, relés, etc.
G	Geradores, fontes de alimentação	Geradores rotativos, alternadores, conversores de frequência, soft-starter, baterias, osciladores
H	Dispositivos de sinalização	Indicadores acústicos e ópticos
K	Contatores	Contatores de potência e auxiliares
L	Indutores	
M	Motores	
N	Amplificadores, reguladores	Componentes analógicos, amplificadores de inversão, magnéticos, operacionais, por válvulas, transistores
P	Instrum. de medição e de ensaio	
Q	Dispositivos de manobra para	Disjuntores, seccionadores, interruptores

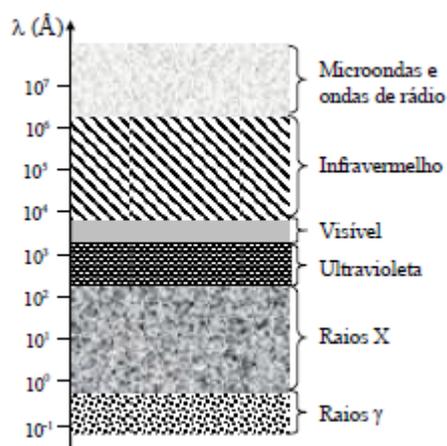
	circuitos	de potência
R	Resistores	Reostatos, potenciômetros, termistores, resistores em derivação, derivadores
S	Dispositivos de manobra, seletores	Dispositivo e botões de comando e de auxiliares posição (fim-de-curso) e seletores
T	Transformadores	Transformadores de distribuição, de potência, de potencial, de corrente, autotransformadores
U	Moduladores, conversores	Discriminadores, demoduladores, codificadores, transmissores telegráficos
V	Válvulas eletrônicas, semicondutores	Válvulas, válvulas sob pressão, diodos, transistores, tiristores
W	Antenas, guias de transmissão e de onda	Jumpers, cabos, barras coletoras, acopladores, dipolos, antenas parabólicas
X	Terminais, tomadas e plugues	Blocos de conectores e terminais, jaques
Y	Dispositivos mecânicos operados mecanicamente	Freios, embreagens, válvulas pneumáticas
Z	Cargas corretivas, transformadores diferenciais, equalizadores, limitadores	Rede de balanceamento de cabos, filtros a cristal

## 4. ÓPTICA

Segundo ZILIO [...] (2010), óptica é o ramo da Física que estuda a propagação da luz e sua interação com a matéria na qual merecem destaque, alguns aspectos sobre a sua natureza, que traçou caminhos paralelos entre a óptica e o eletromagnetismo ao longo dos anos.

A natureza da luz sempre foi um tema tratado com muita atenção por grandes cientistas ao longo dos anos. Desde a antiguidade (300a.C.) desde Euclides, até mais próximo ao século XX com Einstein e Planck. Nos dias de hoje, são duas as teorias aceitas que explicam a natureza da luz: a teoria corpuscular (teoria eletromagnética) e a teoria ondulatória (física clássica). Na teoria corpuscular, a luz é composta por pacotes de energia denominadas fótons. Esta teoria explica fenômenos como o desvio do raio luminoso ao passar perto de corpos celestes. A Teoria ondulatória demonstra que a luz é formada por campos eletromagnéticos oscilantes propagando-se no espaço. Esta teoria explica os fenômenos de reflexão, difração, refração, etc.

No vácuo, a velocidade da luz pode ser considerada como sendo 300.000 km/s. A rigor, a luz é a radiação eletromagnética visível ao olho humano possui comprimento de onda variando de, aproximadamente, 400 a 700nm, sendo que, a radiação próxima ao infravermelho invisível, utilizada na maioria dos sistemas de comunicações de fibras ópticas, possuem também propriedades similares aos da luz visível. A Figura 4.1 mostra o espectro eletromagnético da Luz, de acordo com o comprimento de onda.



Fonte: Adaptado da apostila ZILIO [...] (2010)

Figura 4.1. O espectro eletromagnético

Dependendo da aplicação, a luz pode ser modelada conforme for necessário, porém, não significa que a luz possua comportamentos diferentes. A luz apresenta diferentes fenômenos em cada tipo de modelamento.

Os princípios da propagação de luz introduzidos neste capítulo, visam dar embasamento mínimo para a tecnologia de fibras ópticas, dentro do contexto de aplicações em sistemas de comunicações e, ao final deste, explicar os princípios estruturais e de aplicação das redes elétrico-ópticas.

## 4.1. Propriedades da luz

Através das duas leis citadas que regem as formações da luz, é necessário listar as principais propriedades da luz, para o correto entendimento dos princípios de funcionamento da fibra óptica.

### 4.1.1 Índice de refração

Segundo PAPER [...] 2002, refração é uma grandeza que expressa a velocidade que a luz possui num determinado meio de transmissão. Definido por:

$$n = \frac{c}{v},$$

onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo e  $v$  é a velocidade da luz no meio em questão.

O índice de refração da luz, em qualquer meio, exceto o vácuo, depende do comprimento de onda da luz. Quando se define “ $n$ ”, a luz de diferentes comprimentos de onda possuem velocidades diferentes num certo meio. Além disso, pode-se dizer também que estas são refratadas com ângulos diferentes ao atravessarem uma superfície.

### 4.1.2. Reflexão e refração

Quando a luz incide, com certa inclinação em relação ao plano normal a uma superfície que separa dois meios com diferentes índices de refração, uma parcela da luz atravessará a superfície sofrendo um desvio em relação a este plano normal e a outra parcela será refletida, mantendo-se no meio incidente.

Ao passar pelo meio, a onda sofre um desvio de sua direção natural. Este desvio é determinado através da lei de Snell, que relaciona os ângulos de incidência e refração da luz e os índices de refração nestes dois meios, representada pela equação abaixo:

$$n_i \cdot \sin \theta_i = n_t \cdot \sin \theta_t$$

Quando um raio de luz interage entre dois de diferentes índices de refração, a direção da onda transmitida afasta-se da normal. Ao tempo em que aumenta-se o ângulo de incidência, o raio refratado tende a  $90^\circ$ . Neste caso, o ângulo de incidência recebe o nome de ângulo crítico, ou ângulo limite. Se a luz incidir na superfície com um ângulo maior que o crítico, ela sofrerá o fenômeno da reflexão interna total. Este fenômeno está presente no interior das fibras ópticas quando utilizadas para o transporte de informações.

## 4.2 Fibra óptica

Segundo PAPER [...] 2002, a fibra óptica corresponde ao meio onde a potência luminosa, injetada por um emissor de luz, é guiada e transmitida até que encontre um fotodetector. É formada por um núcleo e uma casca, constituídos de material dielétrico, sendo que, o índice de refração da casca é ligeiramente inferior ao do núcleo, que permite que a luz percorra a fibra por meio de reflexões sucessivas. Esta estrutura é envolvida por plásticos, formando um encapsulamento para proteção mecânica e, este cabo pode conter uma ou mais fibras.

As fibras ópticas possuem duas classes principais:

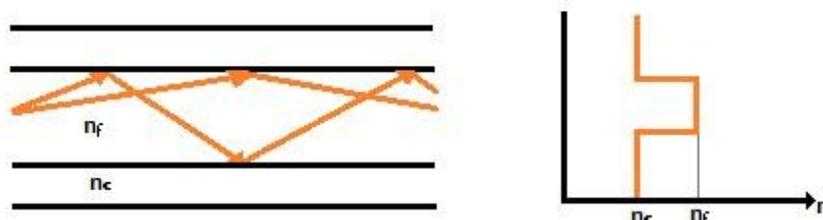
- Monomodo: altíssima capacidade de transmissão, pois propagam apenas o modo fundamental de distribuição eletromagnética (raio axial) em um único modo. Devido a este fato, a propagação segue apenas um caminho único, diminuindo a dispersão do impulso. Possuem dimensões menores, sendo que o núcleo possui diâmetro poucas vezes maior que o comprimento de onda da luz e, devido a sua baixa atenuação (0,7dB/km em 1300nm e 0,2dB/km em 1550nm) e grande largura de banda (10 a 100 GHz.km), são muito empregados nas telecomunicações.
- Multimodo: possuem vários modos de propagação e, de acordo com o índice de refração entre a casca e o núcleo, recebem a classificação de índice degrau e índice gradual.
  - Índice degrau: É o tipo mais simples. Constitui de um único tipo de vidro para compor seu núcleo, ou seja, possui índice de refração constante. Essas fibras possuem capacidade de transmissão limitada, atenuação elevada (acima de 5 dB/km) e pequena largura de banda (menor que 30MHz.km). São utilizadas para transmissão de dados em curtas distância e para iluminação.

- Índice gradual: Possui núcleo composto de vidros especiais com diferentes valores de índice de refração, que tem por objetivo, diminuir as diferenças de tempos de propagação da luz na fibra, criando várias alternativas de percursos no interior do núcleo. Tem capacidade de transmissão elevada, apresentam baixa atenuação (cerca de 3dB/km em 850nm) e largura de banda passante superior as de índice degrau. São empregadas, devido a sua confiabilidade e demais atributos, as redes de telecomunicações.

A fibra óptica é formada por materiais cristalinos e homogêneos, compostos basicamente por sílica e dopantes semicondutores, e, acima de tudo, transparentes o suficiente para guiar um feixe de luz através de um percurso qualquer, seja ele visível ou não. A estrutura das fibras possuem altos índices de refração, quer permitem o fenômeno da reflexão interna total.

Segundo WENTWORTH [...] (2009), as fibras ópticas possuem capacidade de transporte de comunicação muito maior que os cabos coaxiais. Além disso, são menores, mais leves e muito mais flexíveis. Outro fator a seu favor está a sua alta imunidade à interferências eletromagnéticas de diversas origens, como as linhas de transmissão. Por outro lado, a reparação de fibras quebradas é muito mais complexa e os conectores ópticos são caros.

Na figura 4.3, é demonstrada uma seção transversal com a incidência de raios de luz em ângulos diferentes. O perfil do índice de refração é também ilustrado, sendo que, a mudança abrupta em  $n$  é característica de uma fibra com índice degrau.



Fonte: Adaptado de WENTWORTH [...] (2009)

Figura 4.2. Seção transversal e perfil do índice de refração de uma fibra de índice degrau.

### 4.2.1 Propagação na fibra óptica

De acordo com PAPER [...] (2002), o mecanismo básico para propagação da luz nas fibras ópticas são as sucessivas reflexões internas totais. O conceito de modo de propagação está diretamente relacionado com a teoria de propagação de ondas eletromagnéticas de Maxwell, na qual são consideradas as características da fibra óptica como guia de ondas. Apesar da complexidade dos cálculos, é possível realizar aproximações devido as pequenas diferenças entre índices de refração entre casca e núcleo da fibra, facilitando o entendimento matemático em questão.

Segundo Wentworth [...] (2009), em fibras ópticas com índice degrau, somente um modo será propagado se o comprimento de onda no espaço livre for grande o suficiente de modo que:

$$\lambda_0 > \frac{2\pi a / \lambda \cdot n_1 (n_1 - n_2)^{1/2}}{k_{01}},$$

onde “a” é o raio do núcleo da fibra, e  $\lambda$  o comprimento de onda da luz e  $k_{01}$  é a primeira raiz da função de Bessel de ordem zero, igual a 2,495. Assim, vê-se um modo de propagação único é conseguido se for mantida a pequena diferença entre o índice de refração do núcleo e da casca, utilizando uma fibra com diâmetro pequeno.

Para a fibra multimodo com índice degrau, o número total de modos propagantes é aproximadamente:

$$N = 2 \left( \frac{\pi a}{\lambda_0} \right)^2 (n_f^2 - n_c^2)$$

Para as fibras do tipo monomodo, existem valores de V no qual apenas um único modo é possível de se propagar. A Tabela 4.1. mostra um comparativo entre as características típicas para fibras ópticas de vidro.

Tabela 4.1.

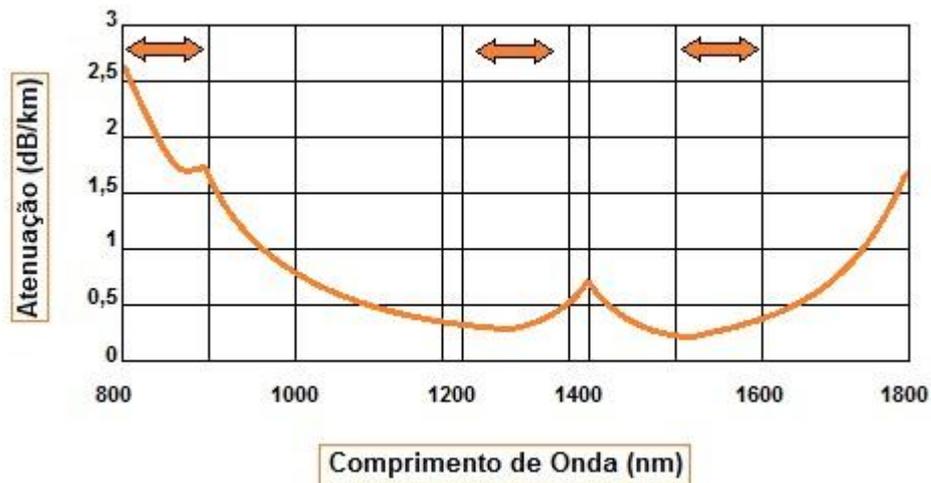
TIPO	$\lambda(nm)$	Diâmetro do núcleo ( $\mu m$ )	Atenuação (dB/km)	Dispersão cromática [(ns/nm)/km]	Dispersão modal (ns/km)
<b>Fibra Monomodo</b>	850	5	4	100	-
	1300	10	0,6	0,003	-
	1550	0,10	0,2	0,003	-
<b>Fibra Multimodo (Índice Degrau)</b>	850	50	0,24	0,10	15
<b>Fibra Multimodo (Índice Gradual)</b>	850	50	0,24	0,10	3
	1300	50	0,20	0,003	0,5

#### 4.2.2 Atenuação

Ao percorrer uma fibra óptica, a luz perde parte de sua potência devido às interações com o material que constitui a fibra. Numa primeira análise, percebe-se que essa perda diz respeito a absorção eletrônica e vibracional, além do espalhamento.

Na absorção eletrônica, a energia da luz, em comprimentos de onda pequenos, pode excitar elétrons do cristal para estados mais elevados. O relaxamento posterior desses elétrons é por emissão de fônons, que são fruto do aquecimento da rede cristalina. Na absorção vibracional, ocorre vibração dos átomos de acordo com seu arranjo no cristal. Se a energia dos fótons for compatível com a energia vibracional, a energia é perdida. Para os comprimentos de onda maiores, isto tende a ser um problema, pois pode causar variações e imperfeições locais no índice de refração.

A Figura 4.3. mostra a atenuação de uma fibra de sílica com três faixas comumente usadas. O pico indicado em 1.400nm é decorrente da absorção vibracional pela contaminação de  $OH^-$  (ion hidroxila). A fabricação desta fibra deve então ser feita com cuidado, para minimizar essa impureza.

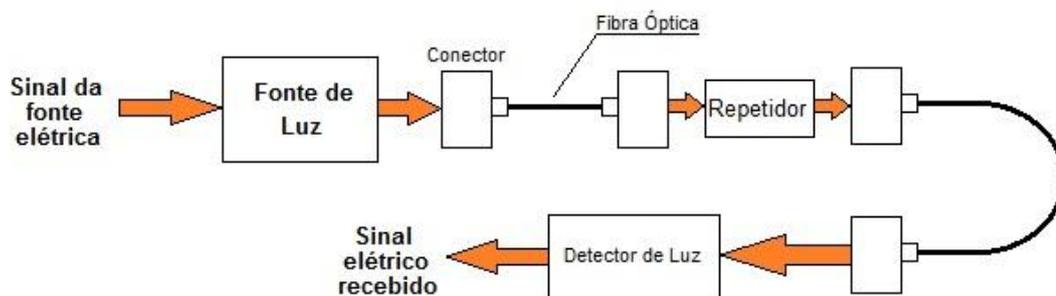


Fonte: Adaptado de WENTWORTH [...] (2009)

Figura 4.3. Atenuação típica em fibra de sílica.

### 4.3 Sistemas de comunicação por fibra óptica

Os componentes de um sistema de comunicação óptica básica, são: Fonte de Luz, Conector Óptico, Repetidor e Detector de luz, conforme detalhado na Figura 4.4. Um sinal de uma fonte elétrica, seja analógico ou digital, modula a corrente de entrada para uma fonte de luz, que, de acordo com a necessidade, modula a intensidade da luz medida. Através de um conector, esta luz é transmitida para uma fibra óptica. Ao longo do percurso da fibra, são conectados repetidores de acordo com a distância, até que encontre um dispositivo no final da linha que detecte a luz e repasse o sinal para outro dispositivo convertê-lo e entendê-lo.



Fonte: Adaptado de WENTWORTH [...] (2009)

Figura 4.4. Componentes de Comunicação por Fibra Óptica

Segundo WENTWORTH [...] As fibras ópticas tem seu funcionamento sem sofrer reduções significativas até aproximadamente 50km sem a necessidade de repetidores e amplificadores.

### 4.3.1 Fontes ópticas

Apenas dois tipos de fontes de luz estão disponíveis para o comprimento de onda entre 0,8 e 1,8  $\mu\text{m}$  utilizado pelas fibras ópticas: Diodos Emissores de Luz (LED's) e Diodos Laser.

Os diodos LED, são dispositivos semi-condutores com os mesmos princípios de funcionamento de outros, de mesmo nome, empregados em vários sistemas eletrônicos, porém, quando polarizados, emitem radiação num espectro de luz invisível, na faixa entre 800 e 1.300nm. Com baixo custo e vida útil longa, são utilizados em sistemas de cuja transmissão possui banda passante de até 200MHz/km.

Para os sistemas de transmissão, os diodos LED possui algumas desvantagens, como:

- Espectro de transmissão de luz é mais largo, ou seja, apresenta várias frequências em torno de uma principal.
- O ângulo de emissão de luz está entre 120° e 180° e o acoplamento de uma fibra multimodo varia de 30° e 40°, o que faz com que exista baixa eficiência de acoplamento.
- Possui certa limitação na velocidade de transmissão e/ou na modulação.
- Nas fibras multimodo, a maior parte da luz não é acoplada, devido a baixa potência de acoplamento (entre 0,01 e 0,1mW).

Os diodos laser ou ILD's, possuem construção semelhante ao LED e, emite luz na região do infra vermelho quando polarizado. Estes ILD's para fibras ópticas são semelhantes aos utilizados em leitores de códigos de barras e leitores de CD-ROM.

As diferenças mais aparentes entre os ILD's e os LED's são: potência de acoplamento maior (da ordem de 0,5 a 5mW para multimodo e 0,25 a 1mW para monomodo), ângulo de acoplamento menor (entre 10° e 35°, implicando em maior eficiência de acoplamento) e poucas frequências ao redor da frequência central. Os ILD's também possuem alta banda passante (cerca de 1GHz/km), altas taxas de transmissão (cerca de 1 Gbps) e altas velocidades de transmissão.

As suas desvantagens ficam por conta do alto custo de produção, sensibilidade a altas temperaturas e vida útil significativamente menor que a dos LED's.

### 4.3.2 Detectores ópticos

Os detectores ópticos ou fotodetectores necessitam ser rápidos e capazes de detectar até os sinais mais fracos. A estrutura mais utilizada é o foto diodo PIN, seguido pelo fotodiodo de avalanche.

Um fotodiodo PIN é formado por uma camada intrínseca (muito pura ou sem dopagem) de semicondutor, que é comprimida por regiões de tipo n e tipo p. Esta grande região intrínseca fornece espaço para a captura dos fótons. Ao receber um fóton, é gerado um par elétron-lacuna. Devido ao fato da junção ser polarizada reversamente, os elétrons são arrastados para o lado n, enquanto as lacunas para o lado p. Assim, uma corrente proporcional à intensidade da luz é formada e, por essa corrente ser fraca, um estágio de amplificação se segue.

Um fotodiodo avalanche (APD) é um componente fortemente dopado com tensão elevada de polarização reversa. Quando um fóton é capturado, imediatamente se forma um par elétron-lacuna. O campo na junção acelera os elétrons e lacunas, fazendo-os atingir átomos, gerando outros pares de elétron-lacuna adicionais. Este é o efeito conhecido como avalanche, que cria um sinal intenso, não necessitando de amplificação. Um problema encontrado neste tipo de detector é o ruído gerado.

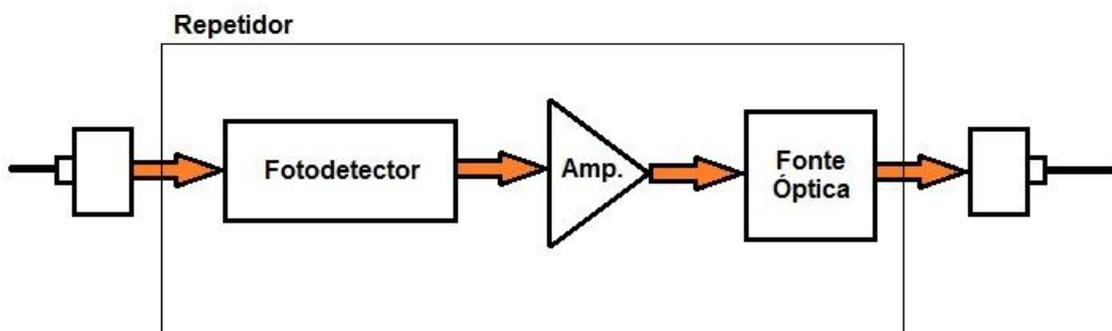
A tabela 4.2 apresenta uma comparação entre os dois tipos de detectores ópticos.

**Tabela 4.2**

	<b>Fotodiodo PIN</b>	<b>Fotodiodo Avalanche</b>
<b>Relação entrada-saída (A/W)</b>		
faixa	0,5 – 0,7	10 – 100
típica	0,6	20
<b>Tempo de subida (ns)</b>		
faixa	0,1 – 0,5	0,25 – 1
típica	0,3	0,3
<b>Sensibilidade (dBm)</b>		
faixa	-40 a -30	-40 a -20
típica	-35	-30
<b>Ruído</b>	baixo	Alto

### 4.3.3 Repetidores e amplificadores ópticos

Repetidores são dispositivos utilizados quando as redes de comunicação ultrapassam o limite de transmissão de 50km. Devido ao alto custo de operação e manutenção, devem ser utilizados apenas em casos especiais como por exemplo em redes ópticas que passam pelo mar. Além disso, ainda necessitam de uma fonte óptica a mais conforme ilustrado na figura 4.5, onde têm-se um repetidor genérico constituído de fotodetector, amplificador e uma fonte óptica.



Fonte: Adaptado do Livro Eletromagnetismo Aplicado (2009)

Figura 4.5. Repetidor Simplificado

Uma opção ao repetidor seria o amplificador óptico, que, não necessita de conversão do sinal óptico em forma elétrica. Neste dispositivo, a entrada do sinal é combinada com a saída de uma fonte semicondutora de laser. Esta fonte excita elétrons em uma fibra dopada com um material, como por exemplo o érbio (EDFA – amplificador de fibra dopada por érbio), para um estado de energia mais elevado. Assim, o sinal óptico estimula o relaxamento desses elétrons, gerando fótons, que fazem com que o sinal seja amplificado. O sinal resultante ainda passa por outro acoplador, de modo que extraia qualquer sinal da fonte laser que não foi convertido.

Existem amplificadores que possuem ganhos da ordem de 40dB e capacidades de potência de saída de até 50mW, sem danificar o sinal não introduzindo ruídos excessivos.

### 4.3.4 Conexões

São constituídos de um ferrolho cilíndrico ou cônico com uma face polida, onde a fibra é alinhada e de uma carcaça de uma capa plástica, conforme ilustrado na Figura 4.6. onde são mostrados 4 modelos existentes no mercado.



Fonte: Adaptado de PAPER [...] (2002)

Figura 4.6. Exemplos de conectores

As conexões devem ser acopladas a fibra cuidadosamente, pois necessitam de um alinhamento cuidadoso dos caminhos ópticos e a redução das reflexões em lacunas de ar, para que as perdas, mesmo inevitáveis, possam ser minimizadas.

## 4.4 Rede eletro-óptica

Para que se possa transmitir sinais elétricos em uma rede de comunicação óptica é necessário, primeiramente, converter os sinais elétricos em sinais ópticos e, no final do sistema, reconvertê-los para elétricos.

Os circuitos elétricos que fazem este tipo de conversão são denominados Conversores eletro-ópticos. O trecho que emite o sinal elétrico é composto por:

- Gerador dos sinais elétricos – comandos elétricos originados de algum sistema com tensão em corrente contínua compatível com o conversor (a maioria tem funcionamento em 12Vcc). Podem haver relés que podem auxiliar no caso do sistema exigir apenas contatos “normal-aberto” e “normal-fechado”, que fazem com que o sinal do comando se comporte como um sinal digital.
- Conversor ou codificador – Converte os sinais elétricos em sinais ópticos.
- Circuito Driver – Controla a polarização elétrica e a emissão de potência.

O trecho intermediário é a própria comunicação óptica, dotada de fonte luminosa, conectores acopladores, fibra óptica e receptor óptico.

O último trecho é formado por:

- Conversor Eletro-óptico: igual ao conversor utilizado no primeiro trecho.
- Amplificador/Filtro: circuito eletrônico que filtra (regenera) e amplifica o sinal elétrico.
- Decodificador: Decodifica os sinais digitais vindos do circuito amplificador.

## 5. ESTUDO DE CASO

Em todo o Brasil, é notado um crescente aumento de crimes envolvendo furto de cabos de cobre, utilizados em linhas de transmissão. Devido ao fato de ser um metal muito valioso (a sucata do cobre é vendida atualmente a cerca de R\$15,00 o quilo), de grande mercado (cobre é o minério mais utilizado em nosso território) e, principalmente a falta de fiscalização, muitos criminosos encontraram nesta modalidade, uma grande fonte de lucro, gerando sérios problemas a sociedade e colocando em risco sua própria integridade física, escalando postes e manuseando cabos energizados.

Mais especificamente no nordeste brasileiro, onde as diferenças sócio-econômicas se tornam ainda mais expressivas, eventos desta categoria são noticiados quase que diariamente. Estes acontecimentos trazem inúmeros prejuízos às concessionárias de energia e, conseqüentemente, estes custos acabam sendo repassados ao consumidor final.

Se levamos em conta regiões afastadas dos grandes centros urbanos, locais muitas vezes escolhidos pelas grandes empresas para a instalação de suas sedes, o problema de furto de cabos se torna ainda mais crítico, pois a fiscalização é praticamente nula.

Levando em consideração os fatos citados, o estudo de caso tem como base, uma solução encontrada por uma importante empresa brasileira do ramo de bebidas, na cidade de São Luis do Maranhão, para driblar este problema.

Empresas deste segmento normalmente tem suas sedes instaladas muito próximas a nascentes de rio ou poços de água, pois estes não podem ser agregados ao seu terreno, na maioria das vezes, por questões ambientais. Para a extração de água, são utilizadas bombas e painéis para o acionamento desta. Pelo fato de que os poços estão localizados a alguns poucos quilômetros de distância da empresa, são instaladas, por conta dela, linhas de transmissão que tem por objetivo alimentar os painéis e bombas, monitorá-las e acioná-las.

Sendo as bombas acionadas por baixa tensão (no caso prático 380V) e a bitola dos cabos serem relativamente pequenas, pois a potência de bombas isoladas não são tão altas e não exigem muita corrente elétrica do sistema, as linhas de transmissão eram dotadas apenas de um conjunto de cabos de bitola fina agrupados em apenas um conjunto simples.

Após alguns meses de operação, os furtos dos cabos começaram a ocorrer. Alguns fatores tornavam propícia esta prática, sendo os principais:

- Localização dos poços: normalmente em mata virgem e protegida do desmatamento, o que faz com que o local sirva como um esconderijo natural para os criminosos.

- Falta de segurança: devido a localização dos poços, seria inviável a contratação de segurança exclusiva para a área. Comparados os custos dos seguidos furtos com a contratação de segurança, pareceria coerente ao curto prazo, porém poderia não ser a solução definitiva.
- Facilidade da remoção: apesar da altura dos postes das linhas de transmissão ser considerável (cerca de 10 metros), os ladrões encontraram maneiras de alcançar os cabos e, talvez devido a bitola deles, não se intimidavam com os riscos do manuseio.

Como os prejuízos decorrentes dos furtos ficam a cargo apenas da empresa, pois as concessionárias só respondem pela qualidade e distribuição da energia até a entrada de fornecimento, se viram obrigados a tomar uma atitude mais drástica afim de resolver este problema permanentemente.

A primeira atitude foi instalar uma linha de transmissão para alimentação das bombas e seus respectivos painéis de acionamento totalmente em média tensão. Desta maneira, a concessionária fornece a energia elétrica em média tensão (15kV), a empresa a recebe, construindo uma subestação, ou seja, um ambiente que propicia a proteção e distribuição de energia a partir da concessionária. Da subestação, são derivados cabos que passam por postes até a chegada nos poços. No final dos poços, são instalados transformadores abaixadores (15kV de primário e 380V de secundário) e por fim, os poços são alimentados. O sistema é ilustrado na Figura 5.1, onde são representadas a subestação, as linhas de transmissão e os dois poços que fornecem água ao ambiente fabril.

Cada bomba de água possuía 10 HP de potência e os painéis eram dotados de uma partida constituída de um inversor de frequência, com velocidades de partida e atuação e desaceleração já fixados no momento da instalação. Na porta de cada painel, foi instalada uma botoeira liga e desliga e um sinalizador indicando que a bomba estava funcionando ou se havia defeito térmico (fator que seria acusado pelo disjuntor-motor que protege o inversor e a bomba).

Como as bombas abasteciam tanques no interior da fábrica, sensores de nível foram instalados neles para a utilização automática do sistema.

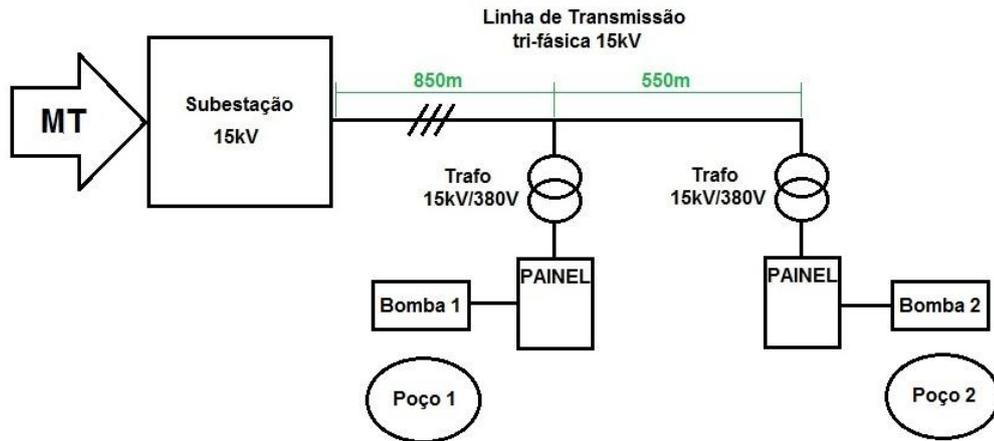


Figura 5.1 Sistema de Alimentação dos Poços em MT

Com a transmissão de energia desta maneira, o problema dos furtos acabou. Talvez pela robustez das instalações, nas quais existem três cabos distanciados entre si com seus devidos isoladores e estruturas nos postes e no final de cada trecho um transformador abaixador de potência superdimensionada com o propósito de intimidação, os crimes dessa natureza cessaram.

## 5.1 Problema apresentado

Após a instalação dos cabos para média tensão nos postes, notou-se que um cabo guia de metal, que antes servia para sustentar a linha de transmissão de comandos elétricos para acionamento a distância das bombas, não havia sido retirado, como mostra a Figura 5.2. Com o passar do tempo, a empresa sentiu a necessidade desta função, pois as bombas deveriam ser monitoradas constantemente, sendo efetuadas paralizações, quando houvesse manutenção nas linhas de processo e a ligação alternada das bombas nos momentos de maior solicitação de água à fábrica.

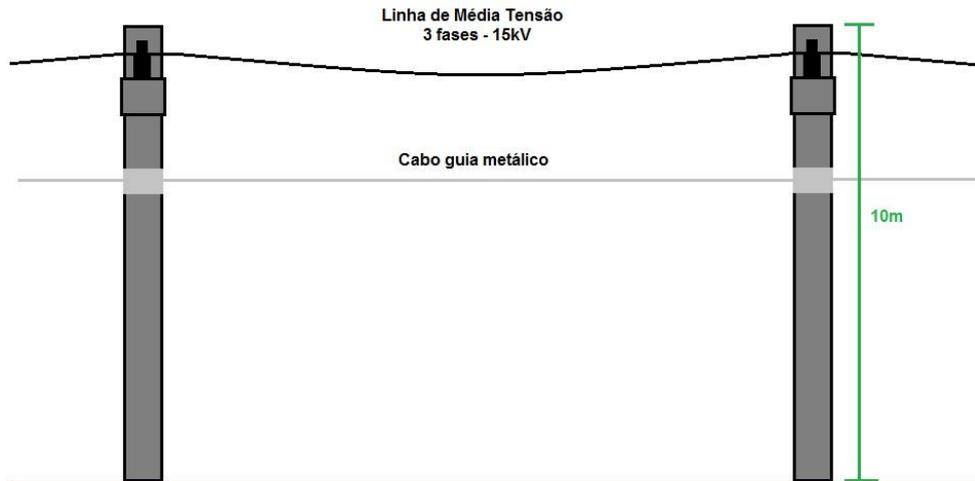


Figura 5.2 – LT em média tensão e cabo guia

Num primeiro momento, foi designado um funcionário para ser responsável pelas máquinas próximas, incluindo as bombas para extração de água. Nos dias em que a produção acelerava, notou-se desgaste físico excessivo deste funcionário, que percorria diversas vezes em uma semana um longo trajeto (superior a 1km) debaixo de um forte sol e de chuvas constantes.

Dada a ineficiência e o desperdício de uma mão-de-obra, a empresa buscou uma solução para este inconveniente. Porém, ao se reunir com engenheiros elétricos responsáveis, notou que, devido ao fato de que a rede de alimentação possuía uma média tensão, existia um efeito denominado acoplamento eletromagnético, que fazia com que, todo o cabo que transmitisse energia elétrica próximo aos cabos de potência, seriam isolados e não haveria possibilidade de comunicação entre painéis e uma botoeira localizada à distância.

## 5.2 A solução encontrada

Ao consultar a empresa KOLTEV de Campinas-SP, que já executava outros serviços de engenharia elétrica dentro desta empresa, foi sugerida a implantação de um sistema eletro-óptico ligando o painel de acionamento a uma botoeira com a configuração “Liga/Desliga/Sinalização”, sob as seguintes justificativas:

- A fibra óptica responde muito bem ao acoplamento eletromagnético, pois sua transmissão é baseada na luz e não na energia elétrica.
- Se bem instalada é extremamente confiável e com baixa atenuação para a distância necessária.

- Os custos, apesar de altos, seriam apenas o da implantação, pois este tipo de rede não necessita de manutenção frequente.

Desta maneira, foi apresentada uma proposta de aproximadamente R\$25.000,00 (vinte e cinco mil reais) para a implantação do sistema, que foi logo acordado devido a necessidade da contratante.

### **5.2.1 Comparativo com outras tecnologias**

Pouco antes do acordo e do pedido lançado, foi questionada a opção de outras alternativas para apresentação a engenharia do cliente. Para tanto, foram levantadas duas outras alternativas: Rede sem fio RF e Instalação em cabos de cobre por tubulação enterrada.

Desta maneira, para cada situação, foram apresentadas os seguintes argumentos:

#### **Instalação de cabos de cobre por tubulação enterrada**

Desvantagens em comparação a rede elétrico-óptica:

1. Alto custo para implantação, tendo em vista que já existia uma infra-estrutura feita por postes.
2. Dadas as irregularidades do terreno e pelo fato do solo conter muitas formações rochosas, haveria muitos problemas para a escavação e o serviço levaria dias.
3. Muita mão-de-obra deveria ser contratada. A implantação da fibra óptica foi realizada por apenas 3 funcionários capacitados em apenas um dia de serviço.
4. Se a distância da tubulação fosse alta, haveria problemas em caso de manutenção e se fosse baixa, poderia ocasionar novos furtos.

Vantagens: A única vantagem seria em relação ao preço dos cabos de cobre em relação à fibra óptica, fato que é totalmente desprezível dadas as desvantagens no comparativo.

## **Rede sem fio RF**

Vantagens em relação à rede eletro-óptica:

1. Baixo custo dos equipamentos. O custo de um sistema em RF cairia consideravelmente em relação a rede eletro-óptica.
2. Simplicidade do sistema. Com uma antena próxima a botoeira e um receptor/transmissor próximos às bombas e alguns repetidores instalados pelo percurso dos postes, tornaria o sistema em questão mais limpo e de fácil instalação.

Desvantagens em relação à rede eletro-óptica:

1. Possibilidade de interferência pelo acoplamento eletromagnético da linha de transmissão de potência.
2. Irregularidade do terreno: Por se tratar de mata virgem, uma grande área com grandes árvores e vegetação nativa deveria ser desmatada, afim de não criar bloqueios que absorvam o sinal de rádio-frequência, o que poderia trazer problemas a empresa podendo inclusive tendo que pagar multas por crime ambiental.
3. Efeito chuva: É talvez a principal desvantagem da aplicação desta tecnologia. Segundo SANTOS [...] (2005), o efeito chuva é causado pela absorção e espalhamento do feixe de onda pela água, sendo que, em situações em que as chuvas são mais intensas, há a possibilidade de existir uma completa interrupção do sinal.

São Luis do Maranhão possui um alto índice pluviométrico entre fevereiro e março, exatamente nos meses de maior demanda por bebidas, o carnaval. Um erro de sinal das bombas durante este período, poderia ocasionar uma parada das bombas e esvaziamento dos tanques, criando problemas no período de maior lucro da empresa.

## **5.3 Implantação do sistema elétrico-óptico**

Para iniciar a implantação do sistema elétrico-óptico em questão, um local no interior da subestação foi reservado para a instalação das botoeiras e painel com o conversor elétrico-óptico, conforme detalhado na Figura 5.3, onde é representado um diagrama de blocos indicando as botoeiras para as duas bombas, com botão liga, botão desliga e

sinalização de bomba ligada e um painel dotado de uma fonte de corrente contínua de 12Vcc e entrada em 220V para alimentar o conversor e os relés auxiliares de contato seco.

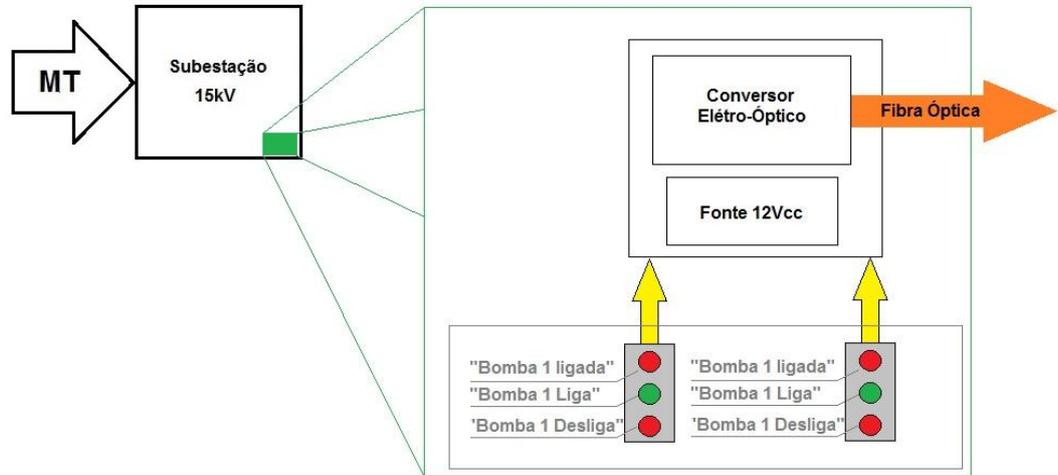


Figura 5.3 – Casa de Máquinas – Acionamento à distância

O conversor escolhido foi o modelo MSD-400 da empresa FiberWan, que possui as seguintes características elétricas conforme data-sheet:

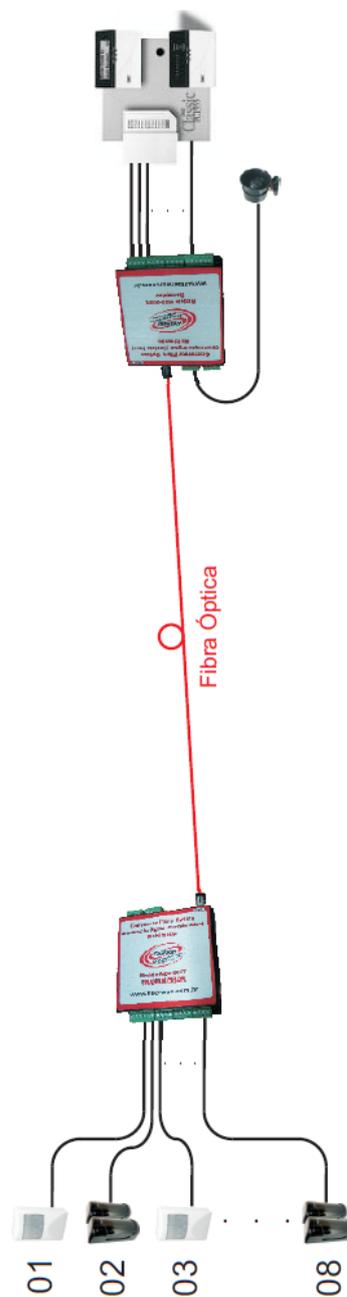
- 4 entradas/saídas;
- Interface óptica: 01 canal – TX ou RX (transmissor/receptor)
- Sinalização: TX e RX Dados/Falha de comunicação;
- Distância máxima: 03 km para fibra multimodo;
- Alimentação: 12Vcc/150mA
- Dimensões: 107x91x27

Conforme a folha de dados do fabricante, este componente tem como finalidade multiplexar os sinais de contato seco de equipamentos de alarme, sinalização, entre outros, para sinais e luz (laser) e transmitir através de uma fibra óptica multimodo, unidirecional. Este componente possui LED de sinalização e um contato (Normal aberto ou fechado), que indica se há alguma falha na comunicação dos conversores.

A grande vantagem da utilização dos conversores ópticos, bem como na linha óptica, está na imunidade das interferências externas ocasionadas por raios, indução de motores, redes elétricas próximas aos cabos de sinais e outros possíveis meios de indução eletromagnética.

As Figuras 5.4 e 5.5 mostram diagrama esquemático padrão do componente e o diagrama de interligações do aparelho, respectivamente, detalhando as entradas/saídas, alimentação em 12Vcc e a saída da fibra óptica.

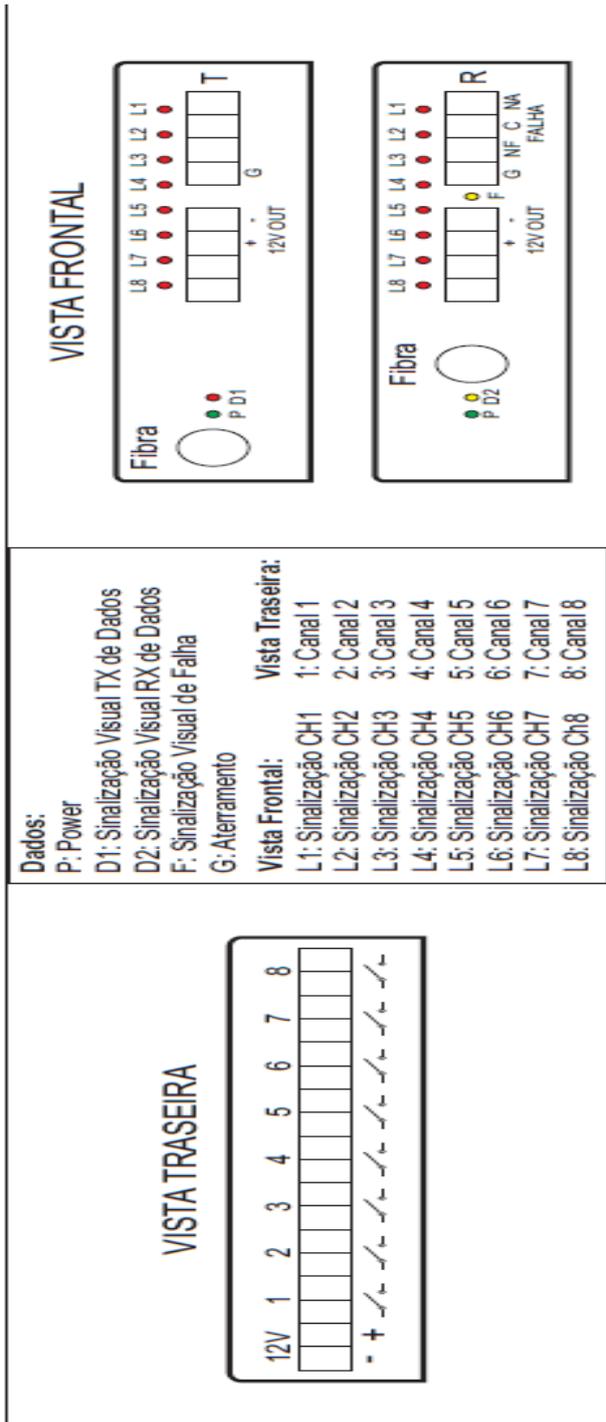
## DIAGRAMA ESQUEMÁTICO



Fonte: Folha de dados da fabricante Fiberwan

Figura 5.4 – Diagrama esquemático do conversor elétrico-óptico

# INTERLIGAÇÕES

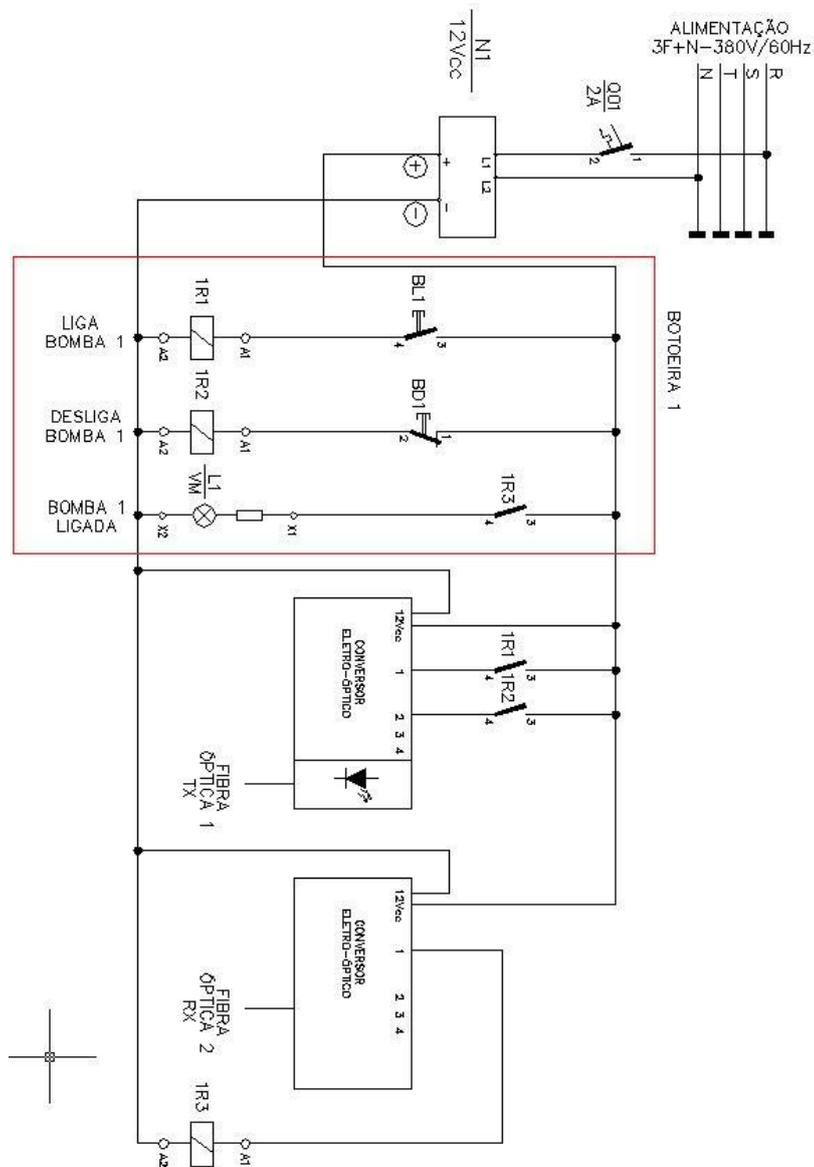


Fonte: Folha de dados da fabricante Fiberwan

Figura 5.5 – Diagrama de interligações do conversor elétrico-óptico

Dada a especificação técnica, foram instalados 2 conversores unidirecionais na casa de máquinas, conforme esquema elétrico representado pela Figura 5.6, onde a fonte 12Vcc é alimentada em 220V (Sistema tri-fásico 380V, 1F+N = 220V, sendo a fase protegida por disjuntor), os botões são conectados a relés, que por sua vez têm seus contatos ligados à entradas do primeiro conversor (transmissor Tx). O segundo conversor (receptor Rx) teve uma saída conectada a um relé que, quando acionado, fecha um contato para o

acionamento da lâmpada de sinalização. O comando em questão é referente a apenas uma bomba, pois para a outra é idêntico salvo as nomenclaturas.



Fonte: Projeto KOLTEV

Figura 5.6 – Comando da botoeira à distância

Após a instalação da botoeira, foi escolhida uma fibra óptica com isolamento reforçada, capaz de suportar os chamados “trancos”. Devido a robustez da instalação, poderia haver situação em que haveria que ser usada força para a passagem dos cabos incondizentes com a delicadeza que o manuseio de uma fibra óptica exige. A energia da Média tensão foi desligada por motivos óbvios de segurança (dada a distância dos cabos de potência até o cabo guia ser pequena) e, conseqüentemente as linhas de envase e produção das bebidas pararam. Ou seja, o serviço devia ser realizado de maneira rápida e eficiente para não comprometer os lucros e metas comerciais do cliente.

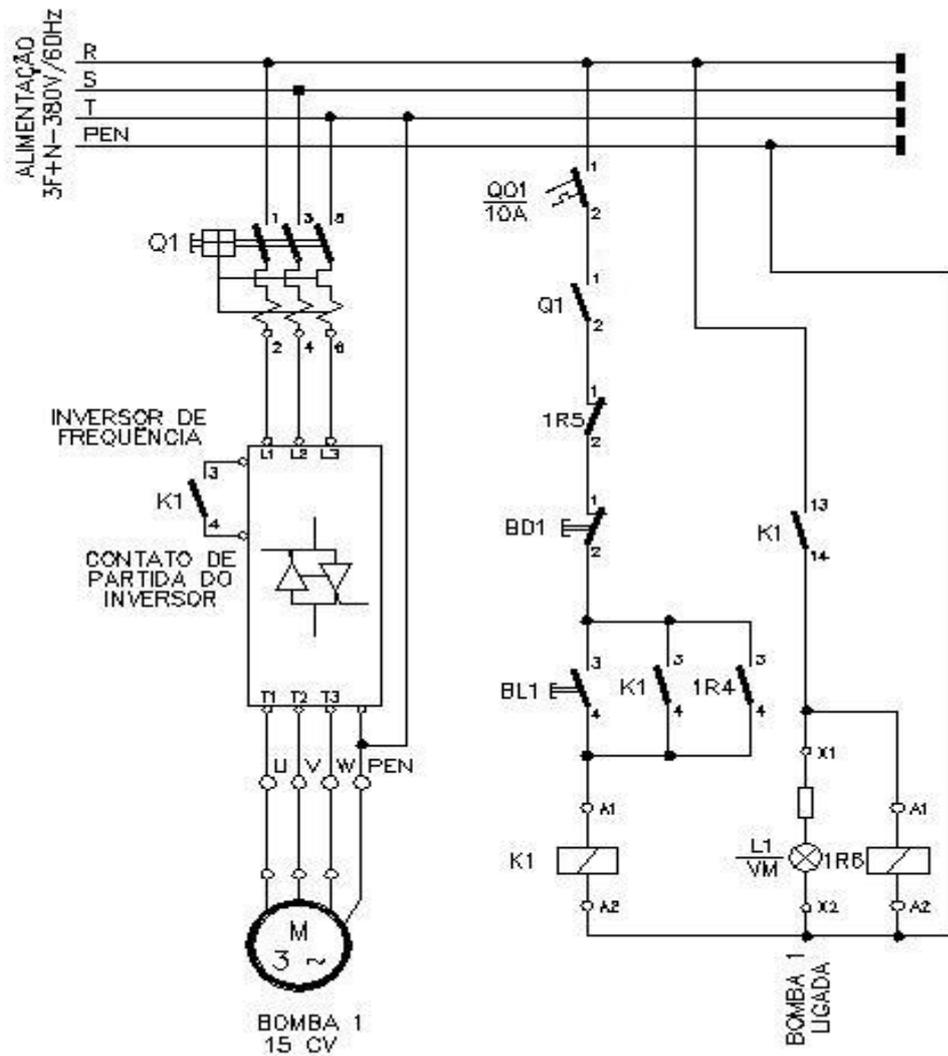
Nos pontos de acoplamento da fibra com os conversores, foi realizado o processo de fusão da fibra, na qual a fibra é acoplada às conexões de maneira exata para que não se formem ângulos entre fibras que comprometem a transmissão do Sinal.

O processo de fusão consiste em colocar duas fibras ópticas alinhadas milimetricamente frente a frente em uma máquina própria, mantendo-se uma pequena distância entre as mesmas. No local onde se encontram estas fibras, existem, de forma perpendicular com as fibras, dois “pólos” também alinhados frente a frente. Ao ligar a máquina, a energia elétrica é passada de pólo a pólo e, pela distância entre eles, são criados arcos voltaicos que, com temperaturas muito elevadas, aquecem as fibras e provocam a fusão das mesmas.

Após este processo, o operador da máquina deve, imediatamente, fazer a cobertura da fibra nos pontos das emendas, utilizando tubos transparentes termorretráteis que contém filamentos de aço inoxidável, afim de garantir a resistência mecânica.

Com a fibra óptica já passada na linha, com os devidos conectores e as fusões realizadas, já era possível realizar as alterações no painel para que se adequassem ao novo sistema. Para tanto, foram instalados no interior desse uma fonte 12Vcc, dois conversores eletro-ópticos (um receptor Rx e um transmissor Tx) e dois relés auxiliares de contato seco.

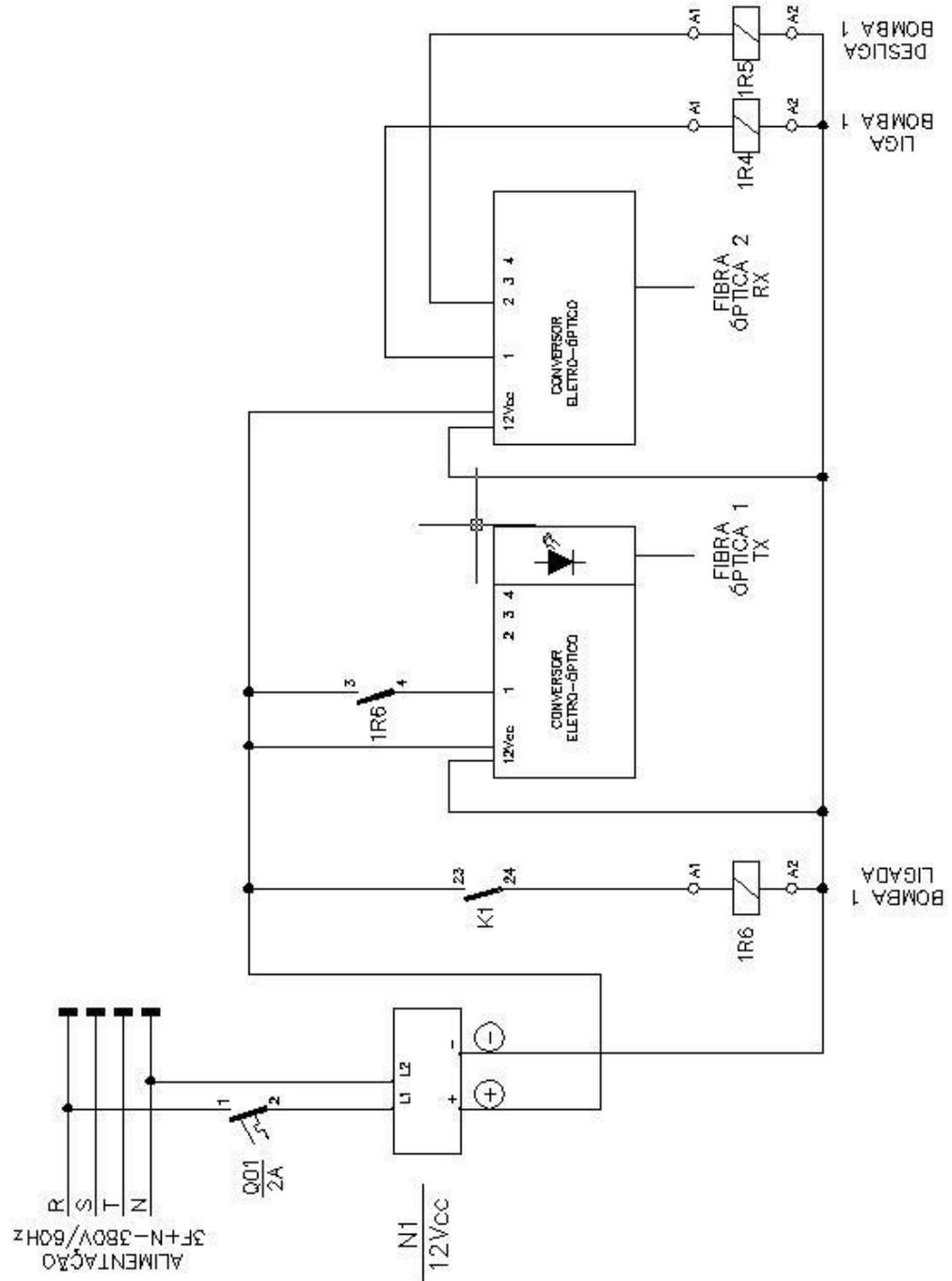
Desta maneira, a Figura 5.7 representa o diagrama elétrico do painel, mostrando o acionamento do inversor de frequência e os contatos dos relés em paralelismo com os botões de acionamento, para dar prioridade de funcionamento tanto no painel como na botoeira. A lógica de funcionamento consiste na energização do contator K1, que possui seu contato normal aberto conectado aos bornes para partida do inversor.



Fonte: Projeto KOLTEV

Figura 5.7 – Diagrama elétrico do painel com partida por inversor de frequência

Assim como na botoeira a distância, os conversores foram instalados juntamente com a fonte de alimentação e os relés auxiliares, como mostra a Figura 5.7, que ilustra os novos componentes instalados no painel da bomba, com a diferença que os relés 1R4 e 1R5 são acoplados nas saídas do conversor 2, pois são os sinais do botão liga e desliga da botoeira à distância, respectivamente e o relé 1R6 é utilizado para enviar o sinal do contato do contator K1, que indica que o inversor está atuando e, conseqüentemente a bomba está em funcionamento.



Fonte: Projeto KOLTEV

Figura 5.7 – Diagrama elétrico do painel com partida por inversor de frequência

Com a implantação do processo concluída, foi realizado um teste para continuidade da fibra óptica através de maquinário especializado e um teste para qualidade da transmissão na presença dos engenheiros responsáveis. Com os testes aprovados e o funcionamento perfeito do sistema, a ART foi assinada e o serviço concluído.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

No decorrer deste trabalho, foi possível verificar o quão vantajoso foi a instalação do sistema eletro-óptico. De fácil instalação e manuseio, se apresentou como uma ótima ferramenta também para aplicações de maior robustez. Oito meses após a instalação deste, não foram detectados erros ou funcionamento em desacordo com o proposto. Com a solução adotada pela empresa de transmissão em média tensão, os problemas de roubos de cabos de cobre cessaram.

Devido à intensa atuação no nordeste brasileiro, vislumbrou a possibilidade de ampliar os conhecimentos técnicos através deste trabalho de conclusão de curso para garantir novos rumos a empresa, uma vez que a empresa atuava apenas na fabricação de painéis elétricos. Apesar ser uma situação extremamente específica, este tipo de caso tem uma possibilidade maior de ocorrer nesta região, pois as diferenças sócio-econômicas que causam os eventos criminosos citados, ainda estão longe de ser sanadas.

O objetivo principal deste, que foi a apresentação da solução do problema apresentado e a implantação do sistema, foi cumprido, mas o estudo não foi encerrado. Com as possíveis reduções dos custos de material em decorrência do constante avanço tecnológico, este tipo de solução ficará ainda mais atrativa. Assim sendo, será possível adotar este tipo de sistema para soluções de casos e transmissão de processos ainda mais complexos.

Num futuro próximo, as soluções descartadas, poderão ser reavaliadas e reestudadas. Para uma empresa sobreviver neste mercado tão competitivo, é necessária uma constante atualização e as oportunidades dadas pela Universidade são ótimos atrativos para tal.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

2.3 INDUTORES. Disponível em: <[www.centelhas.com.br/biblioteca/indutores.pdf](http://www.centelhas.com.br/biblioteca/indutores.pdf)>. Acesso em 20/06/2011

ALVES, Mário Fabiano. Interferências eletromagnéticas em linhas de transmissão de Energia. Seminário dado em Belo Horizonte – MG em 2002. Disponível em: <[http://www.nsaconsultoria.com.br/LT/LT\\_int.htm](http://www.nsaconsultoria.com.br/LT/LT_int.htm)> Acesso em 25/07/2011

CAPÍTULO 5 – Capacitância e Capacitores. Disponível em: <[http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/mod05/m\\_s07.html](http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/mod05/m_s07.html)>. Acesso em 14/08/2011

CATÁLOGO SIEMENS - Inversor de Frequência – Conceitos e Técnicas de Aplicação, 2006. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/16246221/Inversores-de-frequencia-conceitos-e-tecnicas>> Acesso em 13/08/2011

COMANDOS elétricos. 2010. Disponível em <[http://www.cefetsp.br/edu/jaan/com\\_ele.html](http://www.cefetsp.br/edu/jaan/com_ele.html)> Acesso em 22/08/2011

CONHECIMENTO: Veja as linhas de campo magnético da terra. Disponível em: <<http://gaea-habitat.blogspot.com/2011/04/conhecimento-veja-as-linhas-do-campo.html>>. Acesso em 25/04/2011

ESPECIFICAÇÕES de painéis de baixa e média tensão. Catálogo técnico da Empresa LAVILL. 2004

FIBERWAN, folha de dados técnicos. 2009

LEIS de Maxwell. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/55313273/4/Leis-de-Maxwell>>. Acesso em 12/07/2011

LINHAS elétricas em baixa e média tensão. 2009. Disponível em: <<http://www.osetoreletrico.com.br/web/component/content/article/58-artigos-e-materias-relacionadas/94-linhas-eletricas-de-baixa-tensao-e-media-tensao.html>> Acesso em 23/03/2011

LUKITSCH, Walter. Frequency Inverter & Soft-Starter Application Guide – Allen-Bradley Company. Milwaukee-USA. 2007

MAPEAMENTO e Traçado de linhas equipotenciais e determinação de Campo Elétrico, Apostila do Instituto de Física da Unesp Guaringuetá, 2003

MARIANO, William C. ELETROMAGNETISMO Fundamentos e Aplicações. 1ª Edição. Editora Érica Ltda, São Paulo, 2003

MATÉRIAS, Átomos, Moléculas, Corpos simples e compostos. Disponível em: <<http://www.tecnologiadoglobo.com/2009/03/materia-atomos-protos-electros-tabela-periodica/>>. Acesso em 20/05/2011

MENDES, Carlos Alberto Barreiro. Teoria das Linhas de Transmissão, 2005. Disponível em: <[http://www.deetc.isel.ipl.pt/sistemastele/Pr1/Arquivo/Sebenta/Linhas/II\\_Teoria.pdf](http://www.deetc.isel.ipl.pt/sistemastele/Pr1/Arquivo/Sebenta/Linhas/II_Teoria.pdf)>. Acesso em 13/08/2011

PAINÉIS DE MT. Site empresa Focking. Disponível em: <<http://www.fockink.ind.br/portal/abreModulo.aspx?mod=9&pag=72>>. Acesso em 30/09/2011

PAPER Fibras Ópticas. Catálogo técnico da empresa PAPER. São Paulo, 2002

PARTIDA de motores eletricos. 2003. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/23290770/Partida-de-Motores-Eletricos>> Acesso em 20/06/2011

Prof. ULIANA, Jorge Eduardo. Apostila Comandos e Motores Elétricos. São Paulo, 2006

SCHMELCHEN, Theodor. Manual de Baixa Tensão: informações técnicas para aplicação de dispositivos de manobra, comando e proteção. 1ª edição. Siemens S.A. Nobe, São Paulo, 1988

SIEMENS - Métodos de partida versão 2. São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.siemens.com.br>> Acesso em 13/08/2011

WEG, Acionamentos. Informações Técnicas. Comando e proteção para motores Elétricos. Jaraguá do Sul, 1990

WENTWORTH, Stuart. Eletromagnetismo Aplicado. 1ª Edição. Bookman Companhia Editora, São Paulo, 2009

ZILIO, Sérgio. Óptica Moderna , IFSC-USP, São Paulo, 2010