



GSE/013

21 a 26 de Outubro de 2001  
Campinas - São Paulo - Brasil

**GRUPO VIII**  
**GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS - GSE**

**SE ALUMAR - UMA EXPERIÊNCIA PRÁTICA NA APLICAÇÃO DE NOVAS TECNOLOGIAS**

Arno Kladt\*

ABB

Marcelo Pezolato

ABB

Marta Lacorte

ABB

Júlio Flávio Machado

ALUMAR

Alex Reis

ABB

**RESUMO**

O trabalho relata uma experiência prática realizada na aplicação de novas tecnologias em equipamentos de alta tensão e novos conceitos em subestações.

São mostrados os pontos mais significativos do projeto de uma ampliação de uma SE 230KV em operação, ampliação esta que não estava prevista no projeto original.

A solução do problema colocado de acordo com as necessidades do operador foi obtida com a relocação de um banco de capacitores e a aplicação de uma nova tecnologia com a utilização de um módulo integrado de alta tensão (AT), denominado PASS, pela primeira vez no Brasil

O módulo integrado de AT PASS possibilitou uma solução única e criativa num espaço criado e que não permitia a ampliação com o uso de equipamentos de AT convencionais, atendendo ainda aos requerimentos de alta disponibilidade e custos competitivos.

**PALAVRAS-CHAVE**

Nova tecnologia, ampliação, disponibilidade, módulo integrado de AT, compactação.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Para suprir as necessidades específicas do operador era preciso ampliar a subestação de AT, para instalação de mais um transformador de potência de 343MVA 230/34,5kV, um regulador de tensão e o bay para conexão a um sistema de barras duplas, com alta disponibilidade, sem interrupção da operação na subestação existente em um espaço inexistente.

O módulo integrado de AT PASS permitiu que o novo transformador possa ser chaveado selecionando-se a conexão a cada uma das duas barras de 230kV, mesmo no mínimo espaço criado, enquanto que na configuração existente até então, os demais transformadores e reguladores em operação na subestação podem ser conectados somente a uma das duas barras. (2)

A alta disponibilidade no suprimento de energia elétrica é assegurada pelo uso de equipamentos de alta confiabilidade GIS, integrados no módulo de AT PASS, com monitoramento "on line" e autosupervisão. As funções de comando, controle, proteção e medição, também foram integradas em um único cubículo instalado na casa de comando e controle. Com isto criou-se uma solução com baixíssima probabilidade estatística de interrupção no fornecimento de energia elétrica para a carga principal.

**2.0 - CARACTERÍSTICAS DO PROJETO**

**2.1 - Operador**

O operador da subestação é a ALUMAR - Consórcio de Alumínio do Maranhão, situada na cidade de São Luís, MA. A ALUMAR, criada em 1982, iniciou suas operações em Abril de 1984, sendo hoje responsável por aproximadamente 1% das exportações brasileiras.

A unidade de São Luís é um complexo integrado de produção, que envolve desde um Porto, onde são recebidas algumas matérias primas e expedidos os produtos, passando por uma Refinaria que transforma a bauxita em alumina, até uma Redução, que transforma essa alumina em alumínio metálico nas Linhas de Cubas (fornos eletrolíticos).

As Linhas de Cubas são responsáveis em transformar 730 mil/tons ano de alumina em 365mil tons/ano de alumínio em estado líquido através do processo eletrolítico que consiste em circular corrente elétrica da ordem de 220kA médios no banho eletrolítico. Para este fim a ALUMAR possui três linhas de cubas totalizando 610 cubas (fornos). Este alumínio (líquido a 950°C) é sifonado para cadinhos, que são transportados à área do Lingotamento, onde são resfriados e transformados em lingotes.

A alimentação de energia elétrica é feita pela concessionária Eletronorte. A conexão a Rede Básica é feita na SE São Luis II através de duas linhas de transmissão em 230kV com torres independentes e, nas subestações principais da Redução e Refinaria, é rebaixada aos níveis de distribuição(13.8/34.5kV) e consumo, com uma potência total instalada da ordem de 1700MVA e demanda média de 650MW na Redução e 32MW na Refinaria.

Além das duas subestações principais, existem 52 subestações unitárias nas quais estão instalados cerca de 160 transformadores. São 12km de linhas de transmissão em 230kV, 44km de linhas aéreas de distribuição em 13.8kV e mais de 100km de cabos isolados em 13,8kV.

O consumo médio mensal de energia elétrica da Alumar é de aproximadamente 460GWh o que a coloca como uma das maiores indústrias eletrointensivas do continente latino americano, sendo a maior do seu gênero no Brasil.

Os principais insumos desta indústria são a bauxita e a eletricidade, sendo que uma eventual interrupção intempestiva e prolongada no suprimento de energia elétrica nas cubas de fundição do alumínio provoca não somente a correspondente perda da produção como principalmente um dano irreversível das mesmas pela solidificação do alumínio nas cubas de fundição. Isto caracteriza a necessidade de um suprimento de energia elétrica de alta disponibilidade!

## 2.2 - Subestação da Redução

A subestação da Redução, objeto deste trabalho, tem seu arranjo básico em barra dupla com disjuntor de interligação das barras de 230kV e 13,8kV respectivamente. Para a tensão de 34,5kV o arranjo é em barra dupla sem disjuntor de interligação destas barras. Antes da ampliação descrita neste trabalho existiam na subestação da Redução os seguintes equipamentos principais:

- Quatro transformadores abaixadores de 230/34.5kV, com potências variando de 260 à 340MVA, um para cada Linha de Cubas mais um reserva.
- Quatro transformadores reguladores de 34.5/34.5kV , com potências variando de 250 à 319MVA, um para cada Linha de Cubas mais um reserva solidários cada um aos transformadores abaixadores 230/34,5kV.

- Seis Transformadores retificadores, 34.5-0.7kV, 37.6MVA para a Linha de Cubas 1;
- Seis Transformadores retificadores, 34.5-0.89kV, 54.5MVA, para a Linha de Cubas 2;
- Seis Transformadores retificadores, 34.5-0.89kV, 61.3MVA para a Linha de Cubas 3;
- Seis Retificadores de 38kA, 890V para a Linha de Cubas 1;
- Seis Retificadores de 43kA, 1125V para a Linha de Cubas 2;
- Seis Retificadores de 48kA, 1125V para a Linha de Cubas 3;
- Três Filtros de Harmônicos, 34.5kV, 19.2MVA, um por Linha de Cubas;
- Dois Transformadores de Serviços Auxiliares, 230/13.8kV, 50MVA ;
- Equipamentos de manobra , proteção contra surtos e aterramento ;
- Salas de controle , proteção , sistema de supervisão , oscilografia;
- Sistemas de medição de energia , medição AC/DC
- -Switchgear de 13.8kV e sistemas alimentação 125VCC etc.

Há ainda instalados na subestação da Redução, três bancos de capacitores 230kV, 60MVAR, de propriedade da Eletronorte, sendo cada um solidário operacionalmente a uma Linha de Cubas. Pela função que desempenham, estes bancos são extremamente críticos para a operação do sistema elétrico brasileiro interligado (Norte/Sul e Norte/Nordeste). Isto interfere diretamente na forma como devemos operar a nossa subestação, nos levando a buscar meios que minimizem ao máximo os impactos negativos sobre no sistema elétrico nacional e vice-versa.

## 2.3 - Necessidade de ampliação

Já foi mencionado na seção 2.1 a consequência e danos que a interrupção de fornecimento de energia elétrica pode provocar nas instalações da ALUMAR.

No projeto original da subestação da Redução foram previstos para alimentação elétrica das três Linhas de Cubas quatro transformadores abaixadores de 230/34,5kV, sendo um para cada Linha de Cubas e um reserva "hot spare".

O transformador que alimenta a Linha de Cubas II sofreu um sinistro em dez/96. Durante seu reparo, foi encontrada uma falha interna (sem relação com o sinistro) causada por sobreaquecimento localizado na ferragem do núcleo e carbonização dos materiais isolantes fixados nela, que ameaçavam se desprender e serem arrastados pelo fluxo de óleo causando arcos elétricos internos com a conseqüente queima do transformador.

Como os três transformadores remanescentes de alimentação das linhas de cubas tem o mesmo tipo de projeto, análises de óleo comparativas foram feitas e apontaram evidências de pontos quentes incipientes nas ferragens do núcleo dos três transformadores. Decidimos então inspeciona-los internamente e em

Fev/98 concluímos as inspeções. Foram encontradas evidências, em menores proporções, do mesmo tipo de falha encontrada no transformador sinistrado. Comparado com os outros transformadores, o transformador reserva apresentou maiores danos provavelmente por que opera com carga próxima a sua capacidade nominal ao alimentar a Linha de Cubas II.

Uma vez que este tipo de falha pode ocasionar a queima inesperada de qualquer um dos três transformadores, tanto a empresa que executou a inspeção como o fabricante dos transformadores são de parecer que o transformador reserva deveria ser reparado de imediato. Este reparo requer a completa desmontagem da parte ativa do transformador e demandaria pelo menos 8 meses para execução, dos quais 4 meses o transformador estaria indisponível para operação (período da desmontagem ao comissionamento).

As seguintes alternativas foram consideradas.

### **2.3.1 Comprar e instalar um segundo transformador reserva "hot spare",**

Investimento da ordem de (mil US\$) 3,500, tempo de implantação previsto de 10(dez) meses, não havendo risco de continuidade operacional para as Linhas de Cubas durante a implantação do projeto além de prever uso de 100% da vida útil dos três transformadores remanescentes.

### **2.3.2 Reparar os três transformadores**

de forma planejada, um logo após o outro. Investimento de (mil US\$) 3x 2,600= 7,800, tempo de implantação de 16 (dezesesseis) meses, havendo risco de continuidade operacional por 12 meses (tempo de reparo dos três transformadores) e não seria usado 100% da vida útil dos três transformadores.

### **2.3.3 Reparar o reserva "hot spare"**

Investimento de (mil US\$) 2,800, tempo de implantação de 8 meses, havendo risco de continuidade operacional por 4 meses (sem transformador reserva). Seria usado 100% da vida útil dos outros dois transformadores.

### **2.3.4 Deixar como estava e esperar ocorrer a falha dos transformadores**

Investimento de (mil US\$) 3,500 p/unidade reparada com tempo mínimo de 9(nove) meses por reparo nos quais estaríamos sem transformador reserva.

Após análise de custo/benefício optou-se pela alternativa explanada em 2.3.1 "Comprar e instalar um segundo transformador reserva hot spare", pois embora as Linhas de Cubas da Alumar tenham operado 9 meses sem transformador reserva (devido ao sinistro do transformador da Linha de Cubas II), opera-las novamente em condição semelhante mesmo que por 4 meses foi considerado como fator de risco inaceitável pois, na eventual indisponibilidade de um dos transformadores remanescentes por mais de 5horas consecutivas teremos que desligar em definitivo

uma das Linha de Cubas, cessando assim a sua produção.

O benefício esperado do investimento nesta ampliação é assegurar a continuidade no fornecimento de energia elétrica ao processo de produção de alumínio das três Linhas de Cubas, e evitar a interrupção de produção de alumínio ou até o desligamento definitivo de uma das Linhas de Cubas.

Para aumentar a flexibilidade de operação e manutenção foi requerido que o novo transformador pudesse conectado a ambas as barras de 230kV. O diagrama unifilar simplificado da Figura 1 mostra esta ampliação.

## **3.0 - SOLUÇÃO CRIATIVA/INOVATIVA**

Para implantação desta ampliação foram feitas a nível mundial 15 cotações do tipo "turn key". A especificação contemplava preferencialmente equipamentos "estado da arte", permitindo no entanto equipamentos convencionais. Foram recebidas 6 respostas.

Durante o processo de equalização técnica das propostas, verificamos que uma delas, devido as inovações tecnológicas, nos proporcionaria ganhos adicionais em decorrência da redução do espaço necessário aos equipamentos de manobra de AT integrados em um módulo e ao transformador de 230/34,5kV que incorporava dois comutadores sob carga. É evidente que quanto menor o espaço requerido para a ampliação menores serão as obras necessárias para criar a área necessária na SE.

Esta proposta trouxe como recurso adicional ao projeto, a possibilidade de se chavear dois dos bancos de capacitores da Eletronorte nas duas barras de 230kV, permitindo assim maior flexibilidade para manutenção das barras de 230kV, pois quando estes bancos estão fora de operação zera-se o fluxo do intercambio Norte/Nordeste, além de aumento na instabilidade da Norte/Sul.

A tabulação técnica para a comparação das propostas foi composta por mais de 50 itens (1) dentre os quais destacamos:

- Impactos ambientais / conservação de energia
- Aumento na confiabilidade operacional das Linhas de Cubas
- Aumento na flexibilidade operacional para as Linhas de cubas
- Aumento na flexibilidade operacional da Subestação
- Minimizar impactos operacionais da subestação no sistema elétrico nacional.
- Minimizar impactos de exigências do ONS sobre o "modus operandis" da subestação.
- Inovação tecnológica.

Após a equalização, tabulação e ranqueamento das propostas técnicas, verificou-se que a proposta com a utilização de equipamentos de manobra integrado em

um único módulo de AT a SF<sub>6</sub> denominado PASS (do inglês „Plug and Switch“) e transformador de duplo comutador, era a de maior pontuação.

### 3.1 - Restrição de espaço

A subestação da Redução, a despeito do seu dimensional energético foi concebida dentro dos moldes de uma instalação industrial, e assim opera.

Isto traz como implicação direta o espaço reduzido - 150 x 300 metros - e o grande nº de sistemas de controle/intertravamentos e comandos via computador de processo. O Sistema Supervisor da Subestação monitora algo em torno de 1500 pontos com tendência de expansão para 2000 pontos.

Do ponto de vista de flexibilidade operacional e de confiabilidade no fornecimento de energia às Linhas de Cubas o local mais adequado para implantação da ampliação, era o ocupado por um dos bancos de capacitores da Eletronorte.

A relocação do banco de capacitores requereu negociações com a Eletronorte, além de seu apoio técnico durante as obras e comissionamento.

### 3.2 - Módulo integrado de AT PASS

Este módulo foi primordial para a compactação da ampliação. Até seis aparelhos de AT podem ser incluídos no módulo integrado de alta tensão PASS a saber:

- 1) um disjuntor,
- 2,3) uma ou duas chaves seccionadoras seletoras de barras (dependendo da configuração desejada),
- 4) uma chave de terra
- 5) sensor de corrente
- 6) sensor de potencial

Todos estes aparelhos estão juntos em um único tanque de alumínio aterrado e isolados com o gás hexafluoreto de enxofre (SF<sub>6</sub>) - vide Figura 2.

O módulo é conectado ao barramento de um lado e ao transformador do outro lado através de buchas de alta tensão.

O módulo integrado de alta tensão PASS é capaz de executar toda as funções necessárias em um bay nos arranjos mais usuais de subestações.

As características técnicas principais do módulo da AT PASS utilizado na SE ALUMAR são:

Tensão nominal: 245kV

Corrente nominal: 3.150A

Capacidade de interrupção: 40kA

Tensão suportável nominal de impulso atmosférico: 1050kV

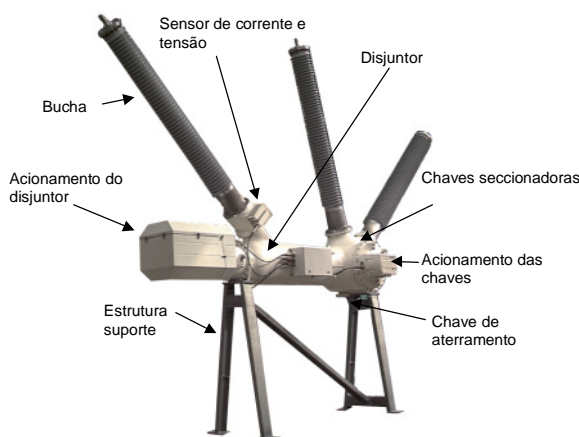


FIGURA 2

Em virtude da proximidade do mar e a poluição inerente do processo industrial optou-se por buchas poliméricas de AT com elevada distância de escoamento, no caso com 8585mm. Esta bucha do módulo integrado de AT PASS é constituída de um tubo de fibra de vidro impregnada com resina de epoxi, isolada com gás SF<sub>6</sub> e coberto com saias de silicone. São estas saias de silicone flexíveis que dão a característica auto-limpante a bucha.

O módulo integrado de AT PASS é comandado através de uma unidade de comando numérico REC580 montada no cubículo integrado de comando e controle, instalado na casa de comando e controle da SE, distante 250m da localização do módulo integrado de AT PASS no pátio de 230kV.

A interligação entre o cubículo e o módulo de AT PASS é feito através de fibras óticas eliminando centenas de cabos de comando e controle e reduzindo substancialmente o tempo de montagem e comissionamento, pois os condutores com fibras óticas são simplesmente rosqueados no módulo e no cubículo na obra.

Uma unidade de comando numérica REC580 é equipada com um quadro sinótico de cristal líquido com indicador de posição e medição, chaves seletoras e de comando, chaves de controle e mostrador de alarmes e eventos.

O mesmo cubículo de comando e controle inclui também a proteção, a medição e monitoramento.

### 3.3 - Alta disponibilidade

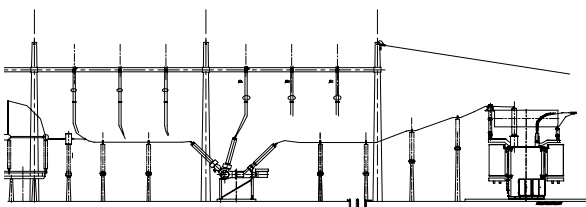
O módulo integrado de AT PASS utiliza os componentes e equipamentos das subestações

blindadas e isoladas a gás SF<sub>6</sub> (GIS) porém ligados a um barramento convencional isolado a ar ao invés de barramento SF<sub>6</sub>. Isto permite uma utilização mais ampla dos componentes e equipamentos GIS cujo grande diferencial é a alta confiabilidade. (4), (5), (6), (7).

Além disto o módulo integrado de AT PASS é equipado com funções de monitoramento e auto supervisão on-line e disponibiliza todos os dados necessários para um diagnóstico mais amplo, permitindo a realização de manutenções preditivas. Assim sendo, os serviços eventualmente necessários podem ser programados nas paradas gerais da instalação ou desligamentos programados evitando-se desligamentos intempestivos e consequentemente danos maiores na instalação.

### 3.4 - Aplicação do PASS ao projeto

A Figura 3 mostra o corte da ligação do módulo integrado de AT ao transformador de potência e as barras de AT. Note-se que não são utilizadas chaves isoladoras para isolar o módulo integrado de AT PASS.



**FIGURA 3**

Este conceito é válido em virtude da alta confiabilidade do módulo sendo demonstrado em estudos comparativos de disponibilidade de que a inserção de chaves isoladoras irá reduzir a disponibilidade do bay.

Chamamos a atenção também para a redução do número de fundações, o que reduz o prazo e custo de construção e a redução do número de conexões de AT, aterramento e fiação secundárias reduzindo-se consequentemente o prazo e custo de materiais de montagem e construção.

Na ampliação descrita o módulo integrado de AT PASS foi equipado também com transformadores de corrente nas buchas de AT no sentido de compatibilizar a proteção deste bay com os demais já existentes na subestação, principalmente a proteção de barras. Os serviços de interligação do módulo integrado de AT PASS as barras de 230kV foram realizadas em linha viva.

### 3.5 - O que o PASS proporcionou adicionalmente

Flexibilidade de operação e manutenção  
Maior confiabilidade e disponibilidade.  
Manutenção preditiva  
Custos totais reduzidos (1), (4)

### 3.6 - Transformador de duplo comutador

A inovação no projeto deste transformador foi a integração do Transformador Regulador ao Transformador Abaixador, formando uma única unidade.

A solução existente até então era composta de duas unidades distintas, sendo uma delas um transformador abaixador de 343 MVA tensão de 230 kV para 34,5 kV com comutador em carga para regulação +7% e - 41% em 22 degraus, e a outra unidade, um transformador Regulador de 280 MVA, tensão de 34,5 kV com comutador em carga para +10% e -10% em 33 degraus.

A nova solução resultou em um único transformador 343 MVA, AT=230 kV e BT=34,5 kV, com dois comutadores em carga, o primeiro instalado no lado AT, que por variação de indução proporciona uma regulação de tensão da BT, adicional à regulação obtida por um segundo comutador instalado na BT através de um transformador série.

O resultado é uma faixa total de regulação de +15% à - 38%, ou seja, alimentado-se a AT com 230 kV pode-se regular a BT desde 21,52 kV até 39,69 kV.

Dentre as vantagens da solução do transformador com duplo comutador podemos citar:

- Compactação da área requerida para a ampliação;
- Redução de custo, devido à eliminação de buchas, central de manobras, acessórios de supervisão, fundações, etc...
- Menor custo de transporte do transformador, que apesar de mais pesado, trata-se agora de uma unidade somente contra duas das anteriores;
- Eliminação de proteções anteriormente existentes para o transformador regulador, tais como os para-raios instalados em ambos os lados de 34,5 KV.

### 3.7 - Energização

A ampliação da subestação de redução na ALUMAR foi montada sem desenergização das barras de AT sendo energizada com sucesso no último trimestre de 2000.

## 4.0 – CONCLUSÕES

**4.1** - Ao buscarmos soluções para os desafios colocados por problemas específicos de projeto, devemos abrir os olhos para as novas tecnologias disponibilizadas no mercado. (3)

**4.2** - A utilização destas novas tecnologias em equipamentos, como a aplicação do módulo integrado de AT PASS na ALUMAR, exige a adaptação do projeto ao conceito de aplicação deste novo equipamento/tecnologia. A aplicação de novas tecnologias no caso não aumentou os custos como ainda trouxe benefícios adicionais. A aplicação de novos equipamentos/tecnologias sem uma mudança de conceitos pode sim criar inútilmente custos adicionais sem uma contrapartida em benefícios. Isto é caracterizado no caso pela supressão das chaves isoladoras! Para quê isolar com chaves isoladoras um módulo integrado de AT de alta confiabilidade? Irá aumentar ou diminuir a disponibilidade?

**4.3** - Desenvolvimento humano: A inovação tecnológica aplicada a este projeto trouxe como forte valor agregado, a necessidade de treinar e qualificar grande contingente de profissionais. Foi necessário treinar pessoal do Fornecedor, projetistas da empresa contratada para detalhar o projeto, pessoal da empresa de montagem, toda a equipe de engenharia, operação e manutenção do Operador além do pessoal das áreas operacionais envolvidas. Isto redundou num contingente de aproximadamente 100 pessoas que receberam algum tipo de incremento positivo na sua qualificação profissional.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Kladt, A., Bittencourt, S., Carvalho, A.C., Cordeiro, M. N., Zakhia, W. S., Evaluation tool of different Substation Concepts, XVII SEPOPE
- (2) Höegg, P., Fuechsle, D., Kara, A., Mueller, A., HV substations, new ideas and concepts for retrofits, extensions and new installations, CIGRE Regional Meeting South East Asia and Western Pacific, 1997, Australia.
- (3) Pedersen, A, Substations of the Future, CIGRE regional meeting, Aug, 1998, Sydney, Australia.
- (4) Carvalho, A.C., Bosshart, P.B., Christiansen, U., Guerra, G., Tang, I., Olovsson, H-E., Functional specification as driver for technical/economical optimisation of substation, CIGRE 2000 Session, group 23, Paris.
- (5) CIGRE WG 23.02, Report on the second international survey on high voltage gas insulated substation (GIS) service experience, CIGRE Brochure, 2000.
- (6) Canadian Electricity Association (CEA), Forced outage performance of transmission equipment, period Jan./1993 to Dec./1997.
- (7) CIGRE WG 13.06, Final report on the second international inquiry on high voltage circuit breaker failures and defects in service, CIGRE Brochure, June 1994.

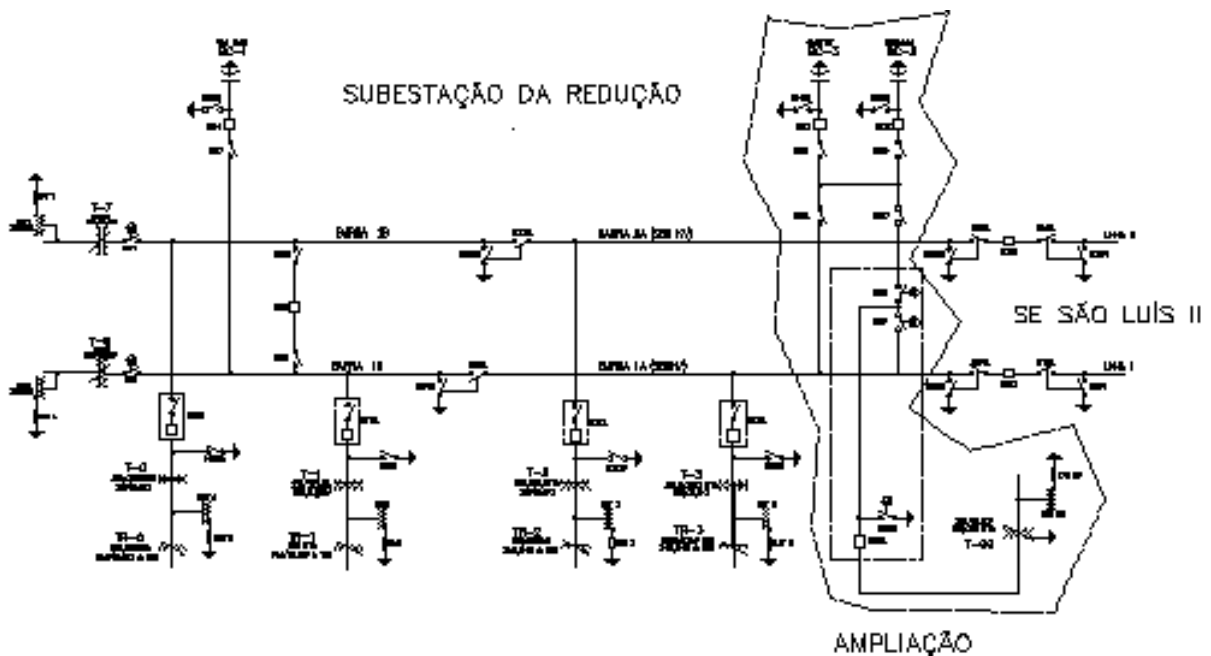


FIGURA 1