



Universidade Federal de Uberlândia  
Faculdade de Engenharia Elétrica

**THIAGO BORGES ANDRÉ**

**ELABORAÇÃO DE UM PROJETO DE PROTEÇÃO DE UMA  
INDÚSTRIA DE AÇÚCAR E ÁLCOOL**

Uberlândia  
2017

**THIAGO BORGES ANDRÉ**

**ELABORAÇÃO DE UM PROJETO DE PROTEÇÃO DE UMA  
INDÚSTRIA DE AÇÚCAR E ÁLCOOL**

Trabalho apresentado como requisito parcial de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: José Wilson Resende

---

Assinatura do Orientador

Uberlândia  
2017

**THIAGO BORGES ANDRÉ**

**ELABORAÇÃO DE UM PROJETO DE PROTEÇÃO DE  
UMA INDÚSTRIA DE AÇÚCAR E ALCOOL**

Trabalho apresentado como requisito parcial  
de avaliação na disciplina Trabalho de  
Conclusão de Curso do Curso de Engenharia  
Elétrica da Universidade Federal de  
Uberlândia.

Uberlândia, 14 de dezembro de 2017.

---

José Wilson Resende  
(Orientador)

---

Adélio José de Moraes  
(Convidado 1)

---

Isaque Nogueira Gondim  
(Convidado 2)

Uberlândia  
2017

## DEDICATÓRIA

Dedico aos meus pais, irmãos e à minha namorada, pelo estímulo, apoio, carinho e compreensão durante todos esses anos.

## **AGRADECIMENTO**

Ao Prof. José Wilson Resende pela motivação, incentivo e orientação deste trabalho.

Aos meus pais, José Alberto e Lúcia Helena pelo apoio incondicional durante esses anos.

À minha namorada Fabiana que sempre esteve do meu lado em todos os momentos.

Aos colegas de turma pelo companheirismo e pelos bons momentos divididos dentro e fora de sala.

## **RESUMO**

Este trabalho apresenta o estudo de proteção contra sobrecorrentes devido às faltas trifásicas para a planta de uma usina de açúcar e álcool. O estudo consiste no dimensionamento dos elementos de proteção desta usina utilizando as funções instantânea (50) e temporizada (51) de relés de sobrecorrente digitais. Serão apresentados os coordenogramas destes elementos, tendo em vista que um sistema de proteção deve atuar de maneira coordenada e seletiva, visando interromper o menor trecho do sistema.

## **ABSTRACT**

This work presents a study of protection against overcurrents due to three-phase faults in a sugar and alcohol plant. The study consists of dimensioning the protection elements of this plant using the instantaneous (50) and timed (51) functions of overcurrent relays. The elements will be demonstrated graphically, keeping in mind that a protection system must be developed in a coordinated and selective way, aiming to interrupt the smallest patch possible.

## FIGURAS

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1-</b> Diagrama Unifilar da indústria .....                                                  | 14 |
| <b>Figura 2</b> - Nível de Curto Circuito para a Barra 3 .....                                         | 15 |
| <b>Figura 3</b> - Nível de Curto Circuito para a Barra 13.....                                         | 16 |
| <b>Figura 4-</b> Relés 1 e 10 dispostos no diagrama unifilar .....                                     | 23 |
| <b>Figura 5</b> - Coordenograma dos relés 1 e 10.....                                                  | 26 |
| <b>Figura 6</b> - Relés 2 e 12 dispostos no diagrama unifilar .....                                    | 27 |
| <b>Figura 7</b> - Coordenograma dos relés 2 e 12.....                                                  | 27 |
| <b>Figura 8</b> - Relés 3 e 13 dispostos no diagrama unifilar .....                                    | 28 |
| <b>Figura 9</b> - Coordenograma dos relés 3 e 13.....                                                  | 28 |
| <b>Figura 10</b> - Relés 4 e 15 dispostos no diagrama unifilar .....                                   | 29 |
| <b>Figura 11-</b> Coordenograma dos relés 4 e 15 .....                                                 | 29 |
| <b>Figura 12</b> - Relés 5 e 18 dispostos no diagrama unifilar .....                                   | 30 |
| <b>Figura 13</b> - Coordenograma dos relés 5 e 18 .....                                                | 30 |
| <b>Figura 14</b> - Relés 6 e 19 dispostos no diagrama unifilar .....                                   | 31 |
| <b>Figura 15</b> - Coordenograma dos relés 6 e 19 .....                                                | 31 |
| <b>Figura 16</b> - Relés 7 e 21 dispostos no diagrama unifilar .....                                   | 32 |
| <b>Figura 17</b> - Coordenograma dos relés 7 e 21 .....                                                | 32 |
| <b>Figura 18</b> - Relés 8 e 22 dispostos no diagrama unifilar .....                                   | 33 |
| <b>Figura 19</b> - Coordenograma dos relés 8 e 22 .....                                                | 33 |
| <b>Figura 20</b> - Relés 9 e 24 dispostos no diagrama unifilar .....                                   | 34 |
| <b>Figura 21</b> - Coordenograma dos relés 9 e 21 .....                                                | 34 |
| <b>Figura 22</b> - Disposição dos relés da concessionária e dos geradores no<br>diagrama unifilar..... | 35 |
| <b>Figura 23</b> - Coordenograma dos relés da entrada da usina, 3 e 13.....                            | 36 |
| <b>Figura 24</b> - Coordenograma dos relés G1, 3 e 13.....                                             | 37 |
| <b>Figura 25</b> - Coordenograma dos relés G2, 3 e 13.....                                             | 37 |

## **TABELAS**

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1- Resultados de curto circuito nas barras do sistema .....    | 17 |
| Tabela 2- Fluxo de Potência do Sistema.....                           | 18 |
| Tabela 3- Fluxo de Potência nas barras do sistema.....                | 19 |
| Tabela 4- Determinação das RTCs dos Transformadores de Corrente ..... | 21 |

## **ABREVIATURAS E SIGLAS**

PSP-UFU – Plataforma de Sistemas de Potência da Universidade Federal de Uberlândia

ANSI – American National Standards Institute

RTC – Relação de Transformação de Transformador de Corrente

DT – Dial de Tempo

# Sumário

|                                                                                       |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>                                                             | <b>13</b> |
| <b>2. DIAGRAMA UNIFILAR .....</b>                                                     | <b>14</b> |
| <b>3. CURTO-CIRCUITO.....</b>                                                         | <b>15</b> |
| <b>4. FLUXO DE POTÊNCIA.....</b>                                                      | <b>17</b> |
| <b>5. DIMENSIONAMENTO DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE .....</b>                       | <b>20</b> |
| <b>6. RELÉS DE SOBRECORRENTE .....</b>                                                | <b>21</b> |
| <b>6.1 Parametrização dos relés.....</b>                                              | <b>22</b> |
| <b>6.2 Ajuste e coordenação das funções temporizada e instantânea dos relés .....</b> | <b>23</b> |
| <b>6.3 Relés dos geradores e da entrada da usina.....</b>                             | <b>35</b> |
| <b>7. CONCLUSÃO .....</b>                                                             | <b>38</b> |
| <b>8. REFERÊNCIAS .....</b>                                                           | <b>39</b> |



## 1. INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência são planejados para disponibilizar energia com qualidade, confiabilidade e continuidade, porém, estão constantemente expostos a circunstâncias como: descargas atmosféricas, falhas na operação, dentre outros. Assim, torna-se necessário um sistema de proteção seletivo e eficaz para assegurar a confiabilidade e a continuidade no suprimento de energia.

A proteção dos sistemas elétricos tem como função a rápida retirada de operação qualquer elemento que sofra curto circuito ou opere sob condição anormal, podendo este causar danos ou interferir na operação restante do sistema. Garantindo a manutenção do fornecimento da energia elétrica aos consumidores e segurança dos equipamentos presentes no sistema (Resende, 2009) .

A utilização de relés de proteção, possibilita controlar e minimizar os efeitos de quaisquer falhas que possam ocorrer, uma vez que estes são os elementos responsáveis por sentirem as anormalidades e comandarem a retirada do elemento defeituoso (Resende, 2009).

O motivo para que seja realizado esse estudo vem da necessidade das indústrias que passaram a utilizar amplamente plantas contendo alto grau de automação, com computadores e microcontroladores, demandarem um sistema elétrico cada vez mais estável e preparado para retirar da rede, o mais rápido possível, eventos que possam causar qualquer tipo de falha nesses equipamentos.

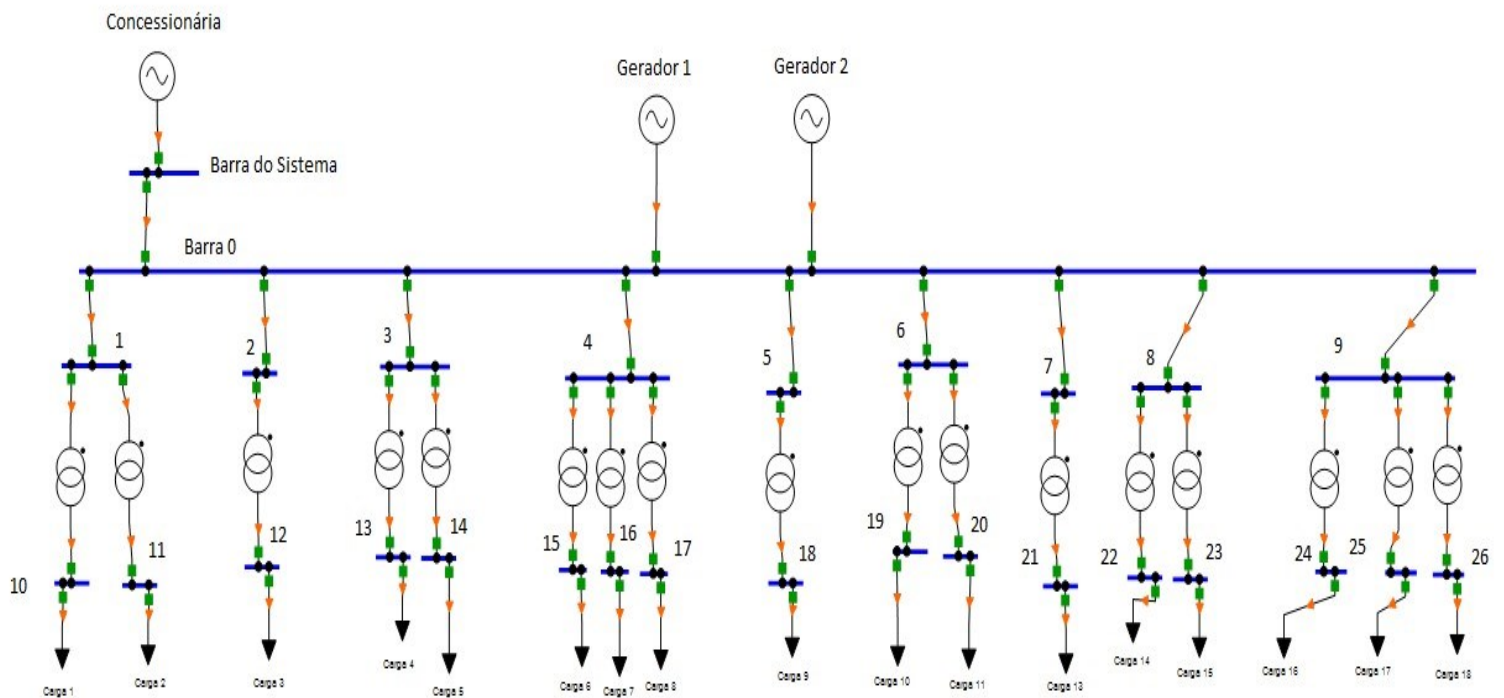
O objetivo deste é garantir que elevadas correntes de curto-circuito não permaneçam circulando por um longo período, o que poderia provocar inúmeros danos aos equipamentos elétricos.

Os cálculos serão realizados com ajuda de softwares, assim como a coordenação dos relés, os quais serão detalhados nos capítulos a seguir.

## 2. DIAGRAMA UNIFILAR

Utilizando o software PSP-UFU – Plataforma de Sistemas de Potência da Universidade Federal de Uberlândia, é inserido o diagrama unifilar da indústria de açúcar e álcool mostrado na figura 1 a seguir:

**Figura 1-** Diagrama Unifilar da indústria



**Fonte -Do autor**

Será realizado o estudo deste onde será detalhado:

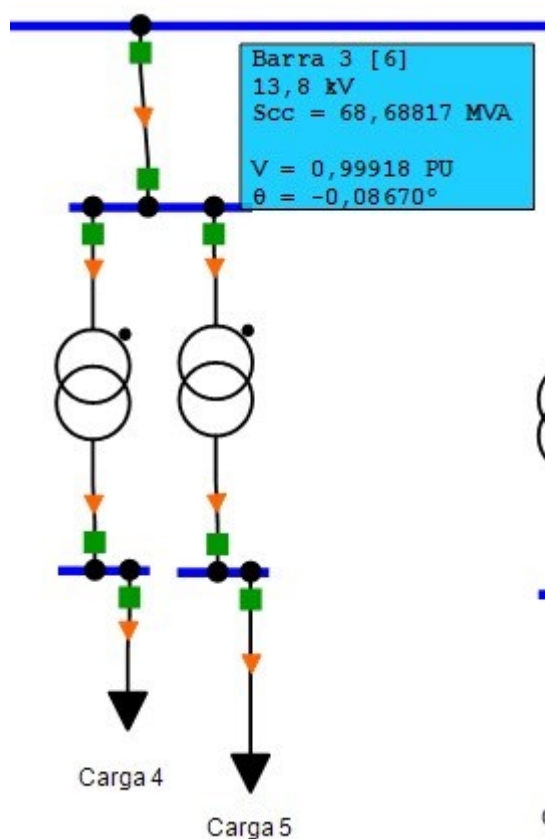
- Cálculo de curto circuito;
- Cálculo dos fluxos de potência;
- Dimensionamento dos TC's;
- Ajuste e coordenação de relés (50/51).

### 3. CURTO-CIRCUITO

Para evitar um curto-circuito, faz-se necessário que toda instalação elétrica seja executada por profissionais experientes e gabaritados. Além disso, algumas medidas de segurança como a instalação de disjuntores ou fusíveis são imprescindíveis para se garantir uma instalação elétrica segura e livre de curtos-circuitos.

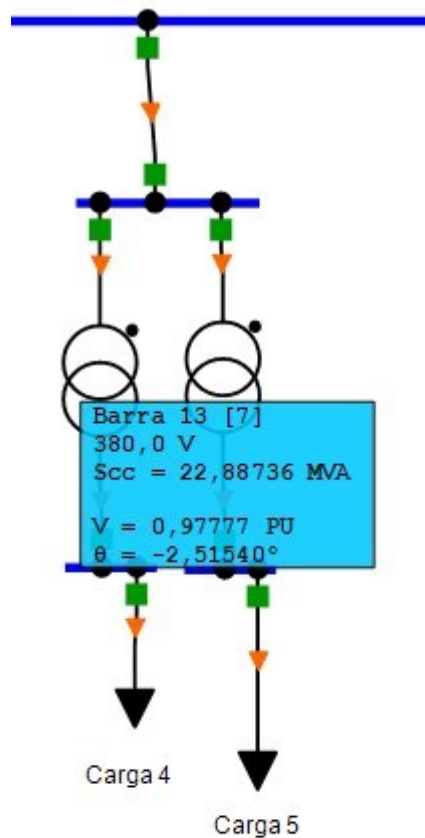
Para o cálculo dos níveis de curto circuito das barras do sistema foi usado o software PSP-UFU, e são mostrados nas figuras 2 e 3 os resultados para a Barra 3 e Barra 13 respectivamente, que são as barras mais sobrecarregadas do sistema.

**Figura 2** - Nível de Curto Circuito para a Barra 3



**Fonte-**Do autor

**Figura 3** - Nível de Curto Circuito para a Barra 13



**Fonte**-Do autor

A seguir é mostrado na Tabela 1 os níveis de curto circuito para todas as barras do sistema, além das correntes de curto. Ainda é apresentado a contribuição da concessionária e dos geradores para o curto.

**Tabela 1- Resultados de curto circuito nas barras do sistema**

| Local do curto | Scc<br>[MVA] | Icc [A]    | Icc(conc)<br>[A] | Icc(geradores)<br>[A] |
|----------------|--------------|------------|------------------|-----------------------|
| Barra Sistema  | 33           | 1380,62021 | 603,417923       | 777,2022854           |
| Barra 0        | 71,26        | 2981,30291 | 1303,01701       | 1678,285905           |
| Barra 1        | 68,67        | 2872,94514 | 1255,65784       | 1617,287301           |
| Barra 2        | 68,96        | 2885,07787 | 1260,96061       | 1624,117261           |
| Barra 3        | 68,67        | 2872,94514 | 1255,65784       | 1617,287301           |
| Barra 4        | 68,96        | 2885,07787 | 1260,96061       | 1624,117261           |
| Barra 5        | 68,67        | 2872,94514 | 1255,65784       | 1617,287301           |
| Barra 6        | 68,96        | 2885,07787 | 1260,96061       | 1624,117261           |
| Barra 7        | 68,96        | 2885,07787 | 1260,96061       | 1624,117261           |
| Barra 8        | 68,67        | 2872,94514 | 1255,65784       | 1617,287301           |
| Barra 9        | 68,96        | 2885,07787 | 1260,96061       | 1624,117261           |
| Barra 10       | 20,38        | 852,637571 | 372,656281       | 479,9812902           |
| Barra 11       | 14,63        | 612,074959 | 267,515279       | 344,5596799           |
| Barra 12       | 14,63        | 612,074959 | 267,515279       | 344,5596799           |
| Barra 13       | 22,89        | 957,648381 | 418,552614       | 539,0957671           |
| Barra 14       | 20,39        | 853,055941 | 372,839135       | 480,2168061           |
| Barra 15       | 20,7         | 866,025404 | 378,507607       | 487,5177972           |
| Barra 16       | 8,48         | 354,777557 | 155,060121       | 199,7174358           |
| Barra 17       | 10,27        | 429,665744 | 187,790972       | 241,8747719           |
| Barra 18       | 4,95         | 207,093031 | 90,5126885       | 116,5803428           |
| Barra 19       | 20,41        | 853,892681 | 373,204843       | 480,6878378           |
| Barra 20       | 7,08         | 296,20579  | 129,460573       | 166,7452176           |
| Barra 21       | 12,27        | 513,339696 | 224,361755       | 288,9779407           |
| Barra 22       | 15,33        | 641,360843 | 280,315054       | 361,045789            |
| Barra 23       | 8,99         | 376,114414 | 164,385671       | 211,7287438           |
| Barra 24       | 14,64        | 612,493329 | 267,698133       | 344,7951957           |
| Barra 25       | 12,27        | 513,339696 | 224,361755       | 288,9779407           |
| Barra 26       | 3,8          | 158,980509 | 69,4844882       | 89,49602075           |

**Fonte – Do autor**

Os valores das correntes de curto circuito estão todos na base de tensão 13,8 KV, embora haja barras na tensão de 380 V. Essa adoção deve-se a opção de colocar os relés para tais barras no lado de alta tensão (primário dos transformadores).

#### 4. FLUXO DE POTÊNCIA

O fluxo de potência consiste em determinar a distribuição das potências que fluem nas linhas do sistema, além das tensões complexas nas barras. Este

estudo serve para verificar o estado operativo do sistema elétrico, além de conferir se o sistema está operando de maneira adequada ou não.

A modelagem matemática para este cálculo consiste em equações algébricas não lineares, e possuem maneiras distintas de serem resolvidas. Para o sistema estudado, o cálculo do fluxo de potência será realizado com o auxílio do software PSP-UFU, pelo método Gauss-Seidel acelerado, com fator de aceleração igual à 1,6 e erro de  $1 \times 10^{-7}$ .

Na Tabela 2 a seguir, é apresentado o resultado do fluxo de potência para todas as linhas e todos os transformadores do sistema calculado pelo software PSP-UFU. Os resultados obtidos com o fluxo de potência serão utilizados adiante para dimensionamento dos Transformadores de Corrente e coordenação dos relés.

**Tabela 2- Fluxo de Potência do Sistema**

| Elemento         | De            | Para     | P [MW]  | Q [MVar] | I [A]    |
|------------------|---------------|----------|---------|----------|----------|
| Linha 1          | Barra 0       | Barra 1  | 2,25    | 1,24     | 107,482  |
| Linha 2          | Barra 0       | Barra 2  | 0,9     | 0,496    | 42,99278 |
| Linha 3          | Barra 0       | Barra 3  | 2,7     | 1,4717   | 128,6506 |
| Linha 4          | Barra 0       | Barra 4  | 2,324   | 1,273    | 110,8601 |
| Linha 5          | Barra 0       | Barra 5  | 0,2025  | 0,1083   | 9,607499 |
| Linha 6          | Barra 0       | Barra 6  | 1,694   | 0,929    | 80,82961 |
| Linha 7          | Barra 0       | Barra 7  | 0,675   | 0,368    | 32,16415 |
| Linha 8          | Barra 0       | Barra 8  | 1,35    | 0,7372   | 64,35234 |
| Linha 9          | Barra 0       | Barra 9  | 1,75    | 0,9608   | 83,52359 |
| Linha 10         | Barra Sistema | Barra 0  | 6,94    | 2,99     | 316,1494 |
| Transformador 1  | Barra 1       | Barra 10 | 1,35    | 0,74042  | 64,41701 |
| Transformador 2  | Barra 1       | Barra 11 | 0,9     | 0,495514 | 42,98297 |
| Transformador 3  | Barra 2       | Barra 12 | 0,9     | 0,496    | 42,99278 |
| Transformador 4  | Barra 3       | Barra 13 | 1,35    | 0,726023 | 64,12954 |
| Transformador 5  | Barra 3       | Barra 14 | 1,35    | 0,740446 | 64,41754 |
| Transformador 6  | Barra 4       | Barra 15 | 1,35    | 0,738571 | 64,37985 |
| Transformador 7  | Barra 4       | Barra 16 | 0,45    | 0,246243 | 21,46101 |
| Transformador 8  | Barra 4       | Barra 17 | 0,52425 | 0,284493 | 24,95443 |
| Transformador 9  | Barra 5       | Barra 18 | 0,2025  | 0,1083   | 9,607499 |
| Transformador 10 | Barra 6       | Barra 19 | 1,35    | 0,740379 | 64,41618 |
| Transformador 11 | Barra 6       | Barra 20 | 0,3445  | 0,18679  | 16,39512 |
| Transformador 12 | Barra 7       | Barra 21 | 0,675   | 0,368    | 32,16415 |
| Transformador 13 | Barra 8       | Barra 22 | 0,9     | 0,491689 | 42,90602 |
| Transformador 14 | Barra 8       | Barra 23 | 0,45    | 0,224179 | 21,03348 |
| Transformador 15 | Barra 9       | Barra 24 | 0,9     | 0,495487 | 42,98242 |
| Transformador 16 | Barra 9       | Barra 25 | 0,675   | 0,368181 | 32,16778 |
| Transformador 17 | Barra 9       | Barra 26 | 0,1755  | 0,095232 | 8,353725 |

**Fonte – Do autor**

Na tabela 3 a seguir são mostradas as potências das barras do sistema.

**Tabela 3-** Fluxo de Potência nas barras do sistema

| Nome               | Tipo | Tensão<br>[PU] | Ângulo     | PG [MW]  | QG<br>[MVar] | PD<br>[MW] | QD<br>[MVar] |
|--------------------|------|----------------|------------|----------|--------------|------------|--------------|
| Barra 1            | PQ   | 0,999307       | -0,072243° | 0        | 0            | 0          | 0            |
| Barra 10           | PQ   | 0,973534       | -2,972843° | 0        | 0            | 1,35       | 0,65385      |
| Barra 11           | PQ   | 0,972667       | -3,065739° | 0        | 0            | 0,9        | 0,4359       |
| Barra 2            | PQ   | 0,999757       | -0,025274° | 0        | 0            | 0          | 0            |
| Barra 12           | PQ   | 0,973132       | -3,015990° | 0        | 0            | 0,9        | 0,4359       |
| Barra 3            | PQ   | 0,999177       | -0,086703° | 0        | 0            | 0          | 0            |
| Barra 13           | PQ   | 0,977772       | -2,515397° | 0        | 0            | 1,35       | 0,65385      |
| Barra 14           | PQ   | 0,973401       | -2,988078° | 0        | 0            | 1,35       | 0,65385      |
| Barra 4            | PQ   | 0,999377       | -0,065294° | 0        | 0            | 0          | 0            |
| Barra 15           | PQ   | 0,974166       | -2,905473° | 0        | 0            | 1,35       | 0,65385      |
| Barra 16           | PQ   | 0,97416        | -2,905489° | 0        | 0            | 0,45       | 0,218        |
| Barra 17           | PQ   | 0,975973       | -2,710580° | 0        | 0            | 0,52425    | 0,253906     |
| Barra 5            | PQ   | 0,999939       | -0,006498° | 0        | 0            | 0          | 0            |
| Barra 18           | PQ   | 0,979936       | -2,280504° | 0        | 0            | 0,2025     | 0,098076     |
| Barra 6            | PQ   | 0,999545       | -0,047588° | 0        | 0            | 0          | 0            |
| Barra 19           | PQ   | 0,97378        | -2,946763° | 0        | 0            | 1,35       | 0,65385      |
| Barra 20           | PQ   | 0,976154       | -2,691042° | 0        | 0            | 0,34425    | 0,166728     |
| Barra 7            | PQ   | 0,99982        | -0,018954° | 0        | 0            | 0          | 0            |
| Barra 21           | PQ   | 0,975279       | -2,785801° | 0        | 0            | 0,675      | 0,326917     |
| Barra 8            | PQ   | 0,999587       | -0,043333° | 0        | 0            | 0          | 0            |
| Barra 22           | PQ   | 0,974686       | -2,849601° | 0        | 0            | 0,9        | 0,4359       |
| Barra 23           | PQ   | 0,976198       | -2,686536° | 0        | 0            | 0,45       | 0,217945     |
| Barra 9            | PQ   | 0,99953        | -0,049168° | 0        | 0            | 0          | 0            |
| Barra 24           | PQ   | 0,972897       | -3,041288° | 0        | 0            | 0,9        | 0,4359       |
| Barra 25           | PQ   | 0,974981       | -2,817665° | 0        | 0            | 0,675      | 0,326917     |
| Barra 26           | PQ   | 0,976139       | -2,692578° | 0        | 0            | 0,1755     | 0,085        |
| Barra 0            | REF  | 1              | 0,000000°  | 6,906502 | 5,595544     | 0          | 0            |
| Barramento Sistema | PQ   | 1,04899        | 7,603549°  | 6,94     | 3,030644     | 0          | 0            |

**Fonte –** Do autor

## 5. DIMENSIONAMENTO DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE

Os Transformadores de Corrente (TCs), tem por finalidade detectar a corrente que circula no seu enrolamento primário e transformá-la em valores suficientemente reduzidos afim de possibilitar a operação dos instrumentos de medição e proteção de alta precisão (Resende, 2009). Para especificação da relação de transformação dos TCs (RTC), considera-se os seguintes aspectos:

A corrente de carga não deve exceder as capacidades dos TCs e dos relés

A corrente secundária não deve exceder os limites de suportabilidade dos relés. A norma ANSI recomenda um Fator de Sobrecorrente (FS) de  $20 \times I_{nom}$ .

Onde  $I_{nom}$  é a corrente nominal que circula no primário do TC.

Na Tabela 4, são apresentados os valores das correntes nominais, das correntes de curto circuito, além das especificações dos RTCs dos Transformadores de Corrente que serão usados para proteção do sistema.

**Tabela 4-** Determinação das RTCs dos Transformadores de Corrente

| Barra    | CORRENTE              |                      |                  |                                   | RTC   |
|----------|-----------------------|----------------------|------------------|-----------------------------------|-------|
|          | CORRENTE DE CURTO [A] | CORRENTE NOMINAL [A] | FS = 20xInom [A] | NOMINAL COM SOBRECARGA DE 20% [A] |       |
| Barra 1  | <b>2873</b>           | 107,5                | 2150             | 129                               | 150/5 |
| Barra 2  | <b>2886</b>           | 43                   | 860              | 51,6                              | 150/5 |
| Barra 3  | <b>2873</b>           | 128,7                | 2574             | 154,44                            | 200/5 |
| Barra 4  | <b>2886</b>           | 111                  | 2220             | 133,2                             | 150/5 |
| Barra 5  | <b>2873</b>           | 9,6                  | 192              | 11,52                             | 150/5 |
| Barra 6  | <b>2886</b>           | 80,8                 | 1616             | 96,96                             | 150/5 |
| Barra 7  | <b>2886</b>           | 32,2                 | 644              | 38,64                             | 150/5 |
| Barra 8  | <b>2873</b>           | 64,3                 | 1286             | 77,16                             | 150/5 |
| Barra 9  | <b>2886</b>           | 83,5                 | 1670             | 100,2                             | 150/5 |
| Barra 10 | 852                   | 64,4                 | <b>1288</b>      | 77,28                             | 100/5 |
| Barra 11 | 612                   | 43                   | <b>860</b>       | 51,6                              | 75/5  |
| Barra 12 | 612                   | 43                   | <b>860</b>       | 51,6                              | 75/5  |
| Barra 13 | 957                   | 64,1                 | <b>1282</b>      | 76,92                             | 100/5 |
| Barra 14 | 853                   | 64,4                 | <b>1288</b>      | 77,28                             | 100/5 |
| Barra 15 | 866                   | 64,4                 | <b>1288</b>      | 77,28                             | 150/5 |
| Barra 16 | 355                   | 21,5                 | <b>430</b>       | 25,8                              | 40/5  |
| Barra 17 | 430                   | 25                   | <b>500</b>       | 30                                | 40/5  |
| Barra 18 | <b>207</b>            | 9,6                  | 192              | 11,52                             | 15/5  |
| Barra 19 | 854                   | 64,4                 | <b>1288</b>      | 77,28                             | 100/5 |
| Barra 20 | 296                   | 16,4                 | <b>328</b>       | 19,68                             | 20/5  |
| Barra 21 | 513                   | 32,2                 | <b>644</b>       | 38,64                             | 40/5  |
| Barra 22 | 641                   | 42,9                 | <b>858</b>       | 51,48                             | 75/5  |
| Barra 23 | 376                   | 21                   | <b>420</b>       | 25,2                              | 40/5  |
| Barra 24 | 612                   | 43                   | <b>860</b>       | 51,6                              | 75/5  |
| Barra 25 | 513                   | 32,2                 | <b>644</b>       | 38,64                             | 40/5  |
| Barra 26 | 159                   | 8,35                 | <b>167</b>       | 10,02                             | 10/5  |

Fonte – Do autor

Em negrito na Tabela 4, tem-se qual valor/critério foi utilizado para especificação do RTC.

## 6. RELÉS DE SOBRECORRENTE

Os relés aplicados nesse trabalho são do tipo temporizado (51) e instantâneo (50). Serão apresentadas neste capítulo, as configurações gerais destes relés.

A grandeza de atuação dos relés 50 e 51, é a corrente fornecida diretamente pelo transformador de corrente (TC). Ao ultrapassar um valor pré-determinado, chamado de corrente de ajuste, o relé comanda a abertura de um disjuntor (Resende, 2009).

A operação do relé pode ser instantânea, o que causa a abertura imediata do disjuntor quando se tem uma corrente maior que a de ajuste, ou pode ser temporizada, com contagem de tempo iniciada a partir da corrente de ajuste. As ações destes relés podem ser associadas, onde o mesmo relé tem as funções temporizada e instantânea.

## 6.1 Parametrização dos relés

A parametrização dos relés digitais de sobrecorrente depende dos valores da Relação do Transformador de Corrente (RTC), do Tape de Corrente do relé, além do Dial de Tempo (dt).

O Tape de Corrente é a corrente ajustada para o relé. É calculado com base na corrente nominal do circuito que é transformada pelo TC. O cálculo pode ser realizado da seguinte forma:

$$\text{Tape} = \frac{I}{RTC}$$

O Dial de Tempo (dt) é o multiplicador de tempo, que é o ajuste necessário para temporizar um relé. Para determiná-lo, é necessário calcular o múltiplo da corrente equivalente que passa no relé, que pode ser encontrado utilizando a seguinte formulação:

$$M = \frac{I_p}{RTC.TAPE}$$

Com esses parâmetros calculados, pode-se então obter o dial de tempo com a equação a seguir:

$$t = \frac{t.K}{(M^\alpha - 1)}$$

Onde:

$t$  é o tempo de atuação do relé;

$K$  é a constante que caracteriza o relé;

$dt$  é o dial de tempo;

$M$  é o múltiplo da corrente de atuação ajustada para iniciar a contagem de tempo;

$\alpha$  é a constante que caracteriza a curva.

Para este estudo, serão utilizadas as curvas muito inversas, que de acordo com a norma IEC 60255-3, tem os seguintes valores para  $K$  e  $\alpha$ :

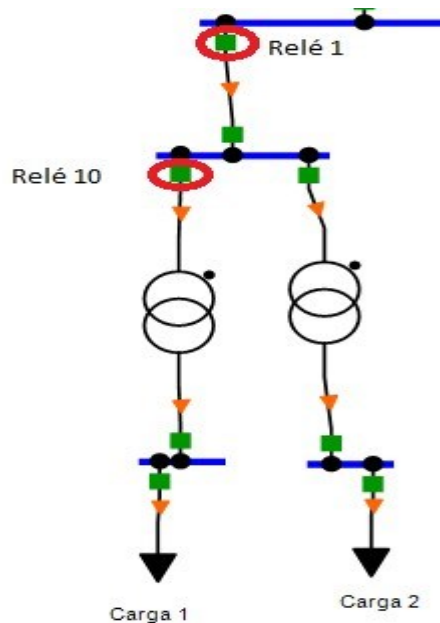
$$K = 13,5;$$

$$\alpha = 1.$$

## 6.2 Ajuste e coordenação das funções temporizada e instantânea dos relés

Primeiramente, serão coordenados os relés 1 e 10, que estão mostrados na Figura 4 a seguir. A escolha do relé 10 (Carga 1) em detrimento do relé 11 (Carga 2), é o maior nível de curto circuito que se têm na Barra 10 em comparação com a Barra 11.

**Figura 4-** Relés 1 e 10 dispostos no diagrama unifilar



**Fonte –** Do autor

Para a coordenação dos relés, lançaremos mão das equações já apresentadas anteriormente.

#### Ajuste do Relé 51-10:

Para cálculo do Tape, será considerado  $I_{nom}$  da barra 10 referido ao primário do transformador. Conforme está mostrado na Tabela 3 como corrente nominal do Transformador 1.

$$I_{nom} = 64,42 \text{ [A]}$$

Para cálculo do Tape, considera-se uma sobrecarga de 20% e utiliza-se a Tabela 4 com os valores dos RTCs. Portanto:

$$Tape = \frac{1,2 * I}{RTC} = 3,86$$

O múltiplo M é calculado com base na corrente de curto que será interrompida pelo relé. Neste caso, um curto na Barra 10 deve ser interrompido em 0,3 segundos. Este tempo é determinado pelo projetista. Logo:

$$M = \frac{I_P}{RTC.TAPE} = \frac{\frac{852,64}{100}}{(5 * 3,86)} = 8,29$$

Com o valor do múltiplo M, podemos achar o valor do dial de tempo, dt, da seguinte maneira:

$$DT = \frac{t.(M^k - 1)}{k} = \frac{0,3(8,29^k - 1)}{13,5} = 0,16$$

#### Ajuste Relé 50-10

O relé 50-10 não deve atuar para um curto na barra superior (Barra 1), portanto, escolhe-se um valor abaixo deste citado e maior que a corrente de curto circuito da Barra 10 (esta última condição é lógica, tendo em vista que se ajustar o instantâneo para um valor abaixo do que foi ajustado o relé 51-10, não haveria necessidade da função temporizada).

Também deve-se atentar para a corrente de Inrush do lado primário do transformador, que atinge valores de até 8 vezes a corrente nominal.

Este efeito é considerado para um tempo de 0,1 segundo e o relé deve ser capaz de

suportar esta corrente, uma vez este fenômeno é característico em todos os transformadores.

Tem-se então que:

$$I_{Inrush} = 8. I_{nom} = 515,36 \text{ [A]}$$

$$I_{ajuste} = 0,75. I_{cc} = 2164,5 \text{ [A]}$$

Escolhe-se a maior corrente, que neste caso é a corrente de ajuste pela corrente de curto circuito.

O valor da corrente de ajuste no secundário do relé será:

$$I = \frac{I_{ae}}{RTC} = 108,225 \text{ [A]}$$

Ajuste relé 51-1

A determinação do Tape deste relé é análoga à feita anteriormente, para o relé 51-10. Será considerada a corrente nominal da Linha 1.

$$I_{nom} = 107,5 \text{ [A]}$$

$$Tape = \frac{1,2 \cdot I}{RTC} = 4,3 \text{ [A]}$$

Para o cálculo do múltiplo M, utiliza-se a corrente de interrupção da função instantânea do relé anteriormente calculado.

$$M = \frac{I}{1,2 \cdot I} = 16,78$$

Para cálculo do dial de tempo, faz-se necessário conhecer o tempo de abertura do relé 51-10 para a corrente de curto circuito determinada

anteriormente. Assim tem-se:

$$t = \frac{t.K}{(M^{\alpha}-1)} = \frac{0,16.13,5}{\left(\frac{2164,5}{1,2 \cdot 64,42}\right)^1 - 1} = 0,081 \text{ segundos}$$

O relé 51-1 deve ter um  $\Delta t = 0,3$  segundos, logo:

$$t_1 = 0,081 + 0,3 = 0,381 \text{ segundos}$$

Agora calcula-se o dt do relé 51-1 a partir do tempo encontrado anteriormente.

$$DT = \frac{t.(M^{\alpha}-1)}{k} = \frac{0,381(\frac{2164,5}{13,5} - 1)}{13,5} = 0,445$$

#### Ajuste do relé 50-1

De maneira análoga a feita anteriormente, a corrente de ajuste deste relé deve estar entre a corrente de curto circuito da Barra 10 e Barra 1.

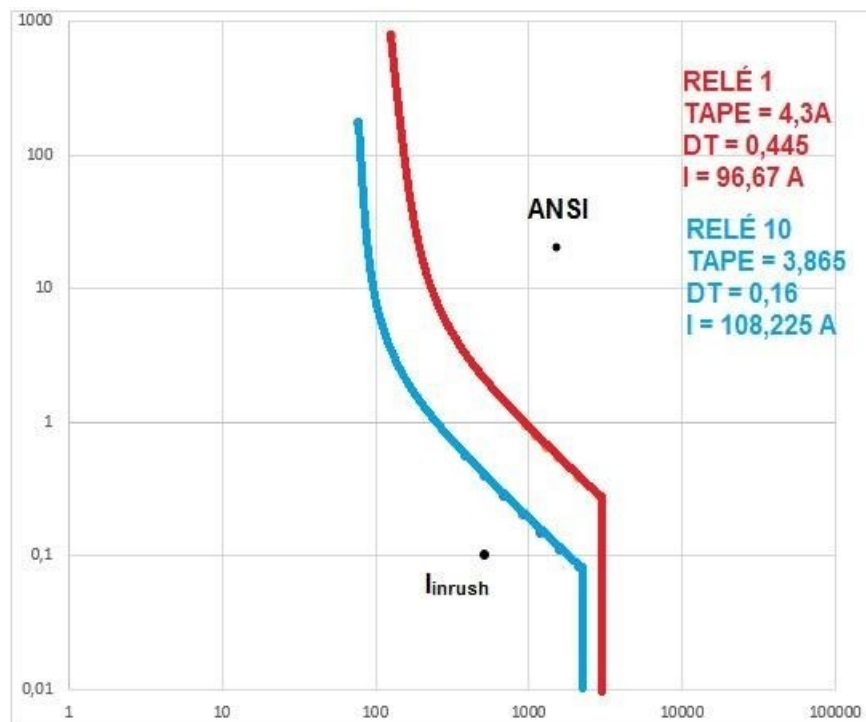
$$I_{ajuste} = 2900 \text{ [A]}$$

O valor da corrente no secundário do relé é igual a:

$$I = \frac{I_{ae}}{RTC} = 96,67 \text{ [A]}$$

Com todos os parâmetros já determinados, é possível traçar um coordenograma, o qual nos mostra num gráfico corrente versus tempo, o comportamento dos relés. Na figura 5 a seguir é mostrado o coordenograma dos relés 1 e 10 ajustados conforme acima.

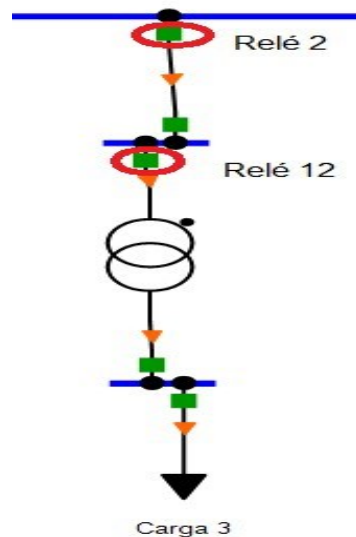
**Figura 5 - Coordenograma dos relés 1 e 10**



Fonte – Do autor

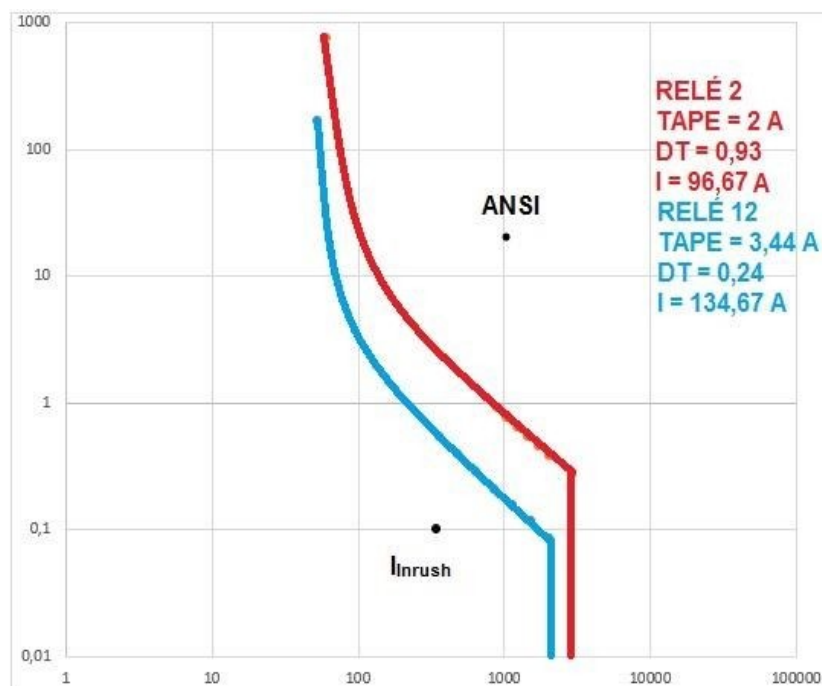
Com o auxílio do software Microsoft Excel, serão feitos todos os cálculos e coordenogramas dos próximos relés, seguindo os mesmos passos e condições já explicados. A disposição dos relés no diagrama unifilar bem com seus coordenogramas serão expostos a seguir.

**Figura 6** - Relés 2 e 12 dispostos no diagrama unifilar



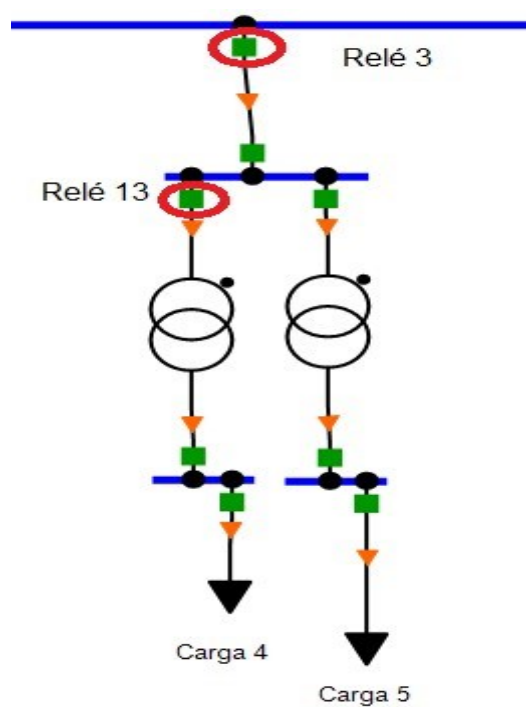
**Fonte** – Do autor

**Figura 7** - Coordenograma dos relés 2 e 12



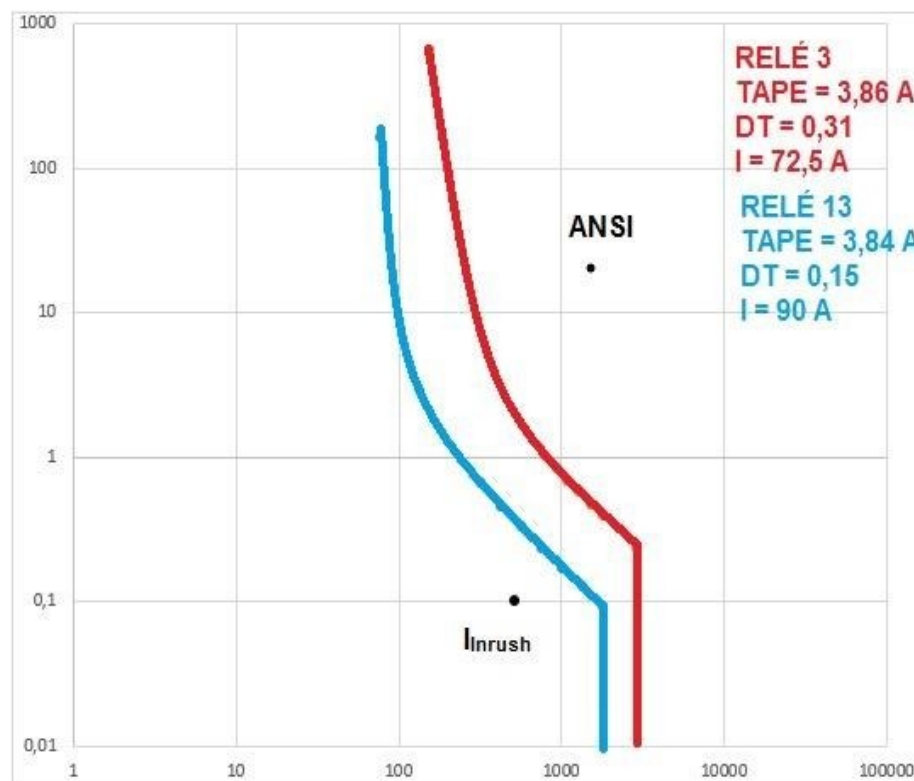
**Fonte** – Do autor

**Figura 8** - Relés 3 e 13 dispostos no diagrama unifilar



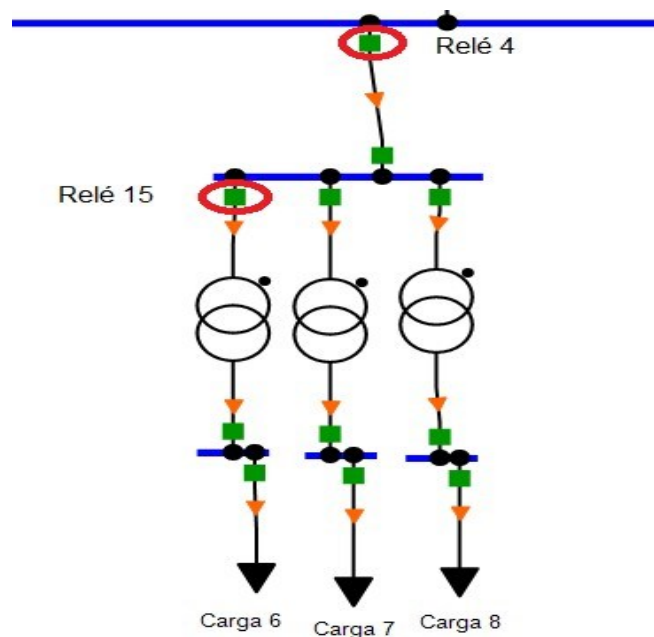
Fonte – Do autor

**Figura 9** - Coordenograma dos relés 3 e 13



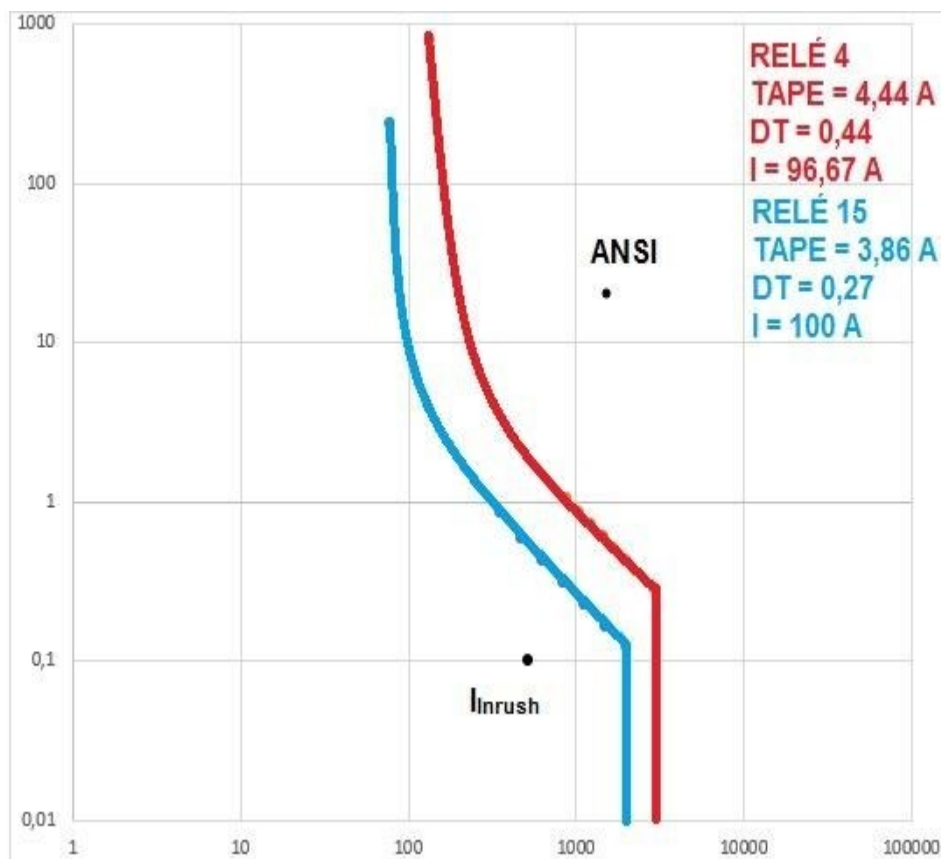
Fonte – Do autor

**Figura 10** - Relés 4 e 15 dispostos no diagrama unifilar



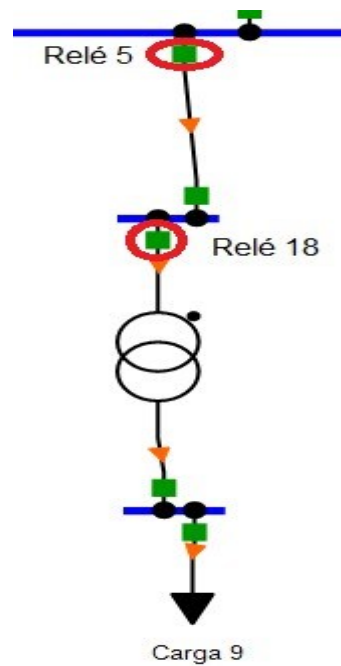
**Fonte** – Do autor

**Figura 11**- Coordenograma dos relés 4 e 15



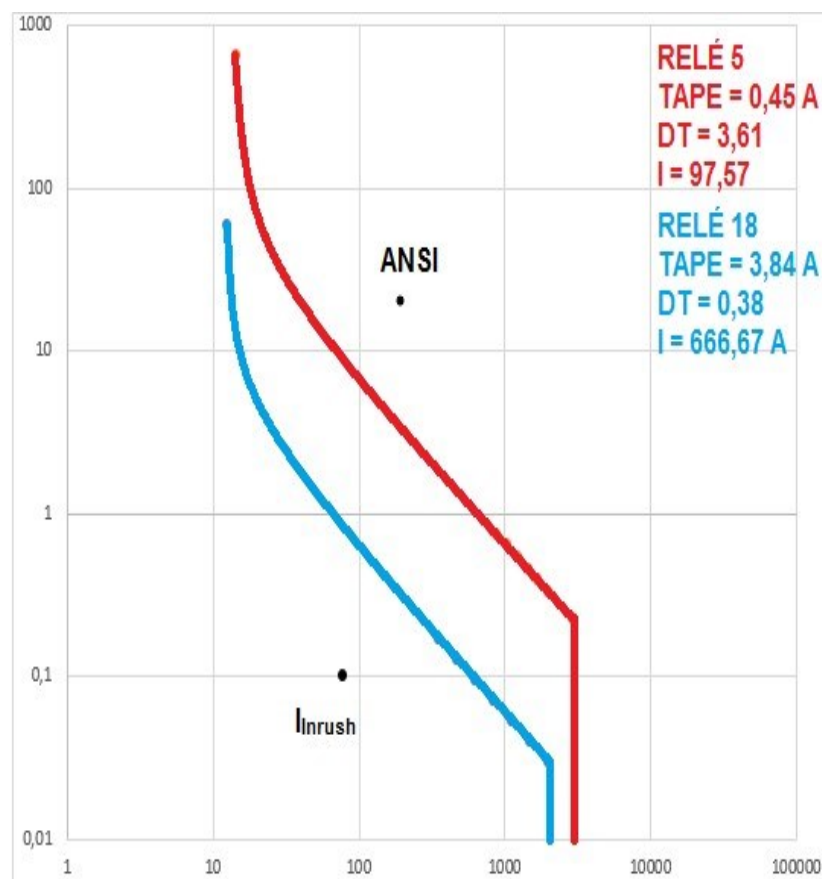
**Fonte** – Do autor

**Figura 12** - Relés 5 e 18 dispostos no diagrama unifilar



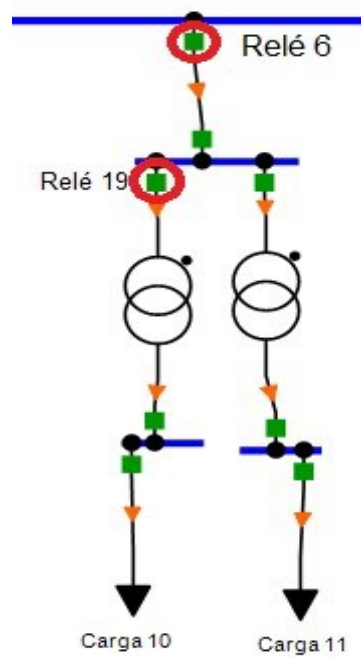
**Fonte** – Do autor

**Figura 13** - Coordenograma dos relés 5 e 18



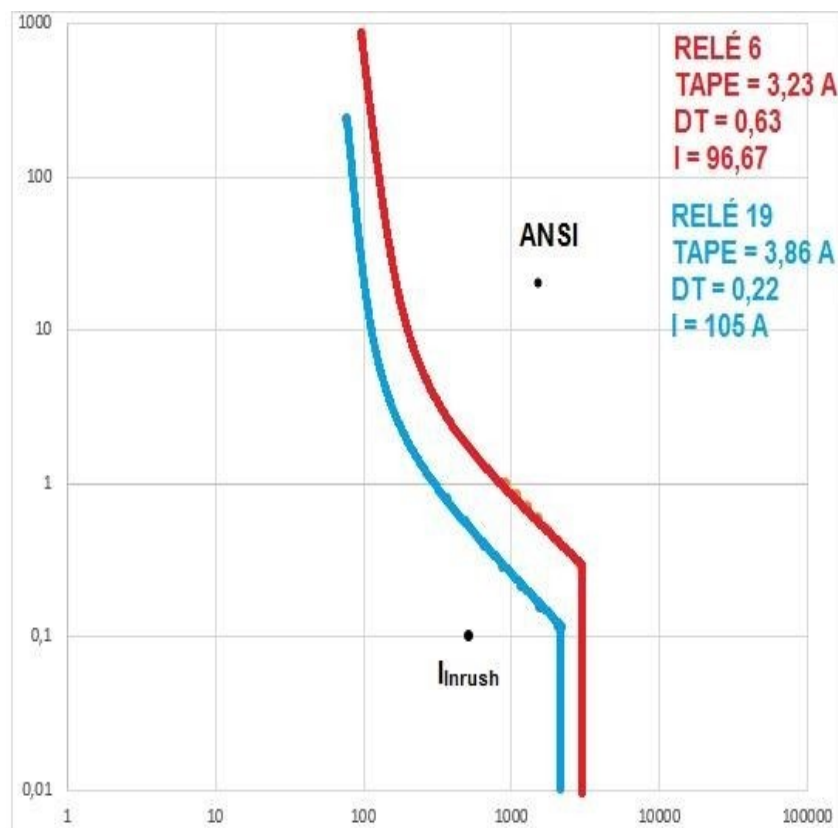
**Fonte** – Do autor

**Figura 14** - Relés 6 e 19 dispostos no diagrama unifilar



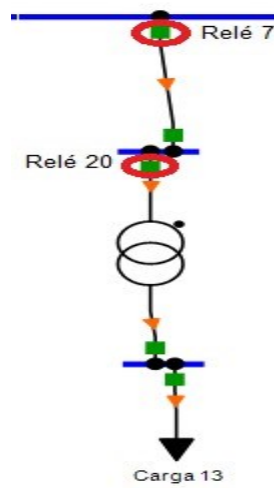
**Fonte** – Do autor

**Figura 15** - Coordenograma dos relés 6 e 19



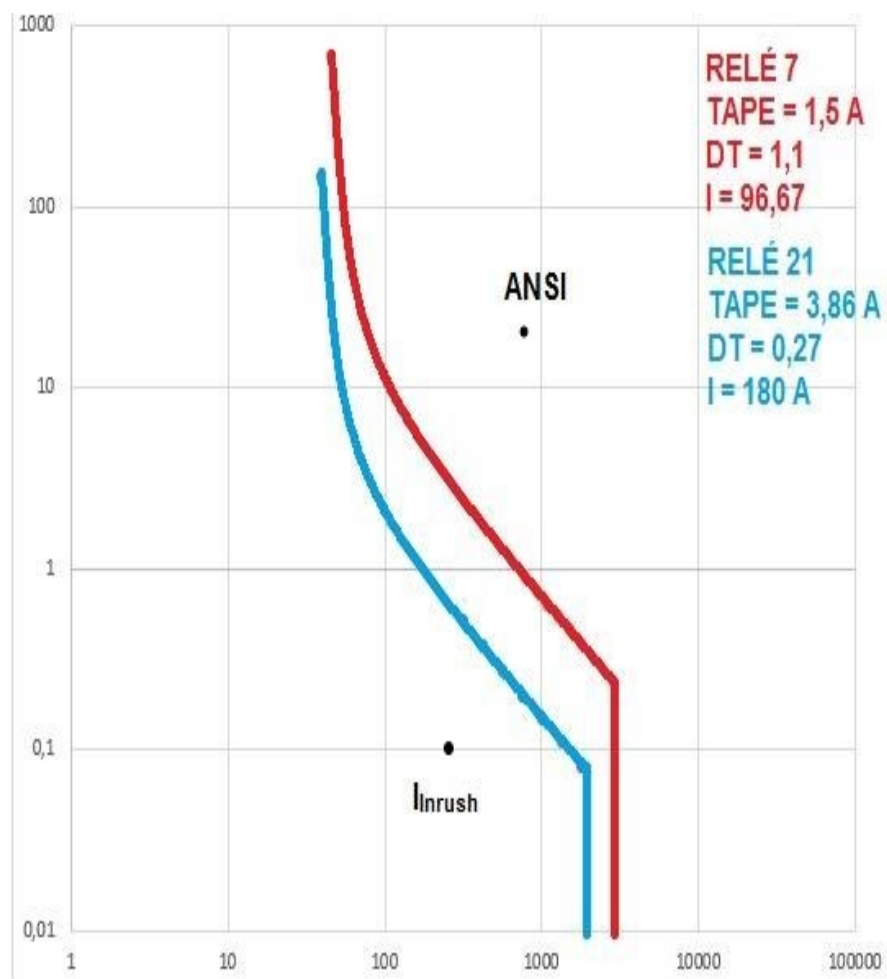
**Fonte** – Do autor

**Figura 16** - Relés 7 e 21 dispostos no diagrama unifilar



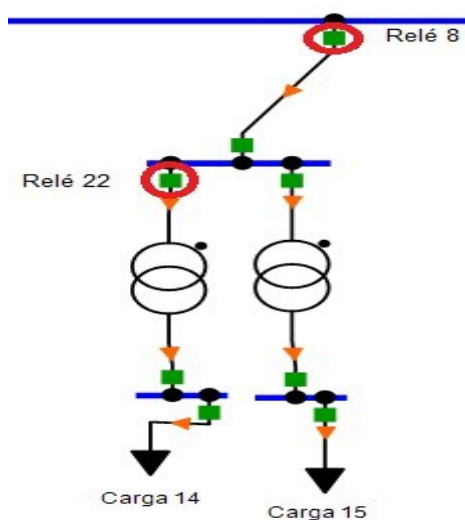
Fonte – Do autor

**Figura 17** - Coordenograma dos relés 7 e 21



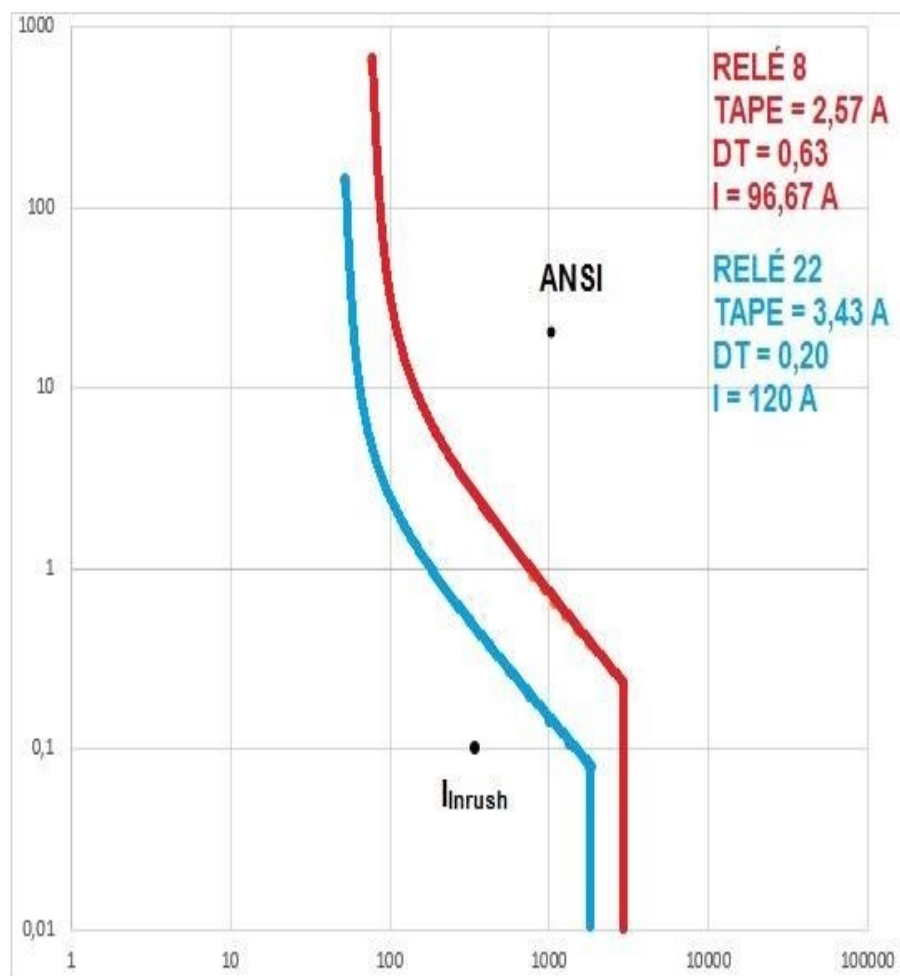
Fonte – Do autor

**Figura 18** - Relés 8 e 22 dispostos no diagrama unifilar



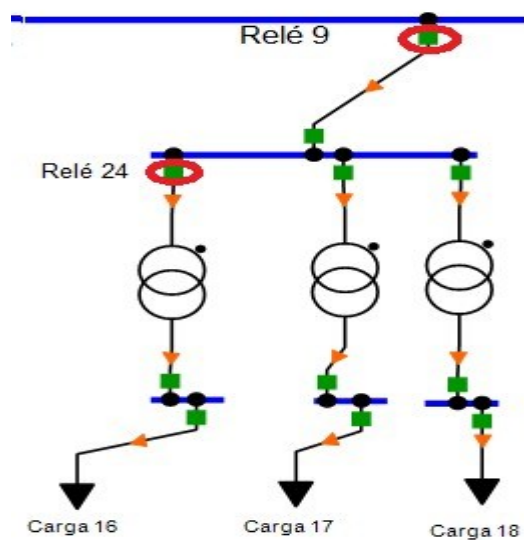
**Fonte** – Do autor

**Figura 19** - Coordenograma dos relés 8 e 22



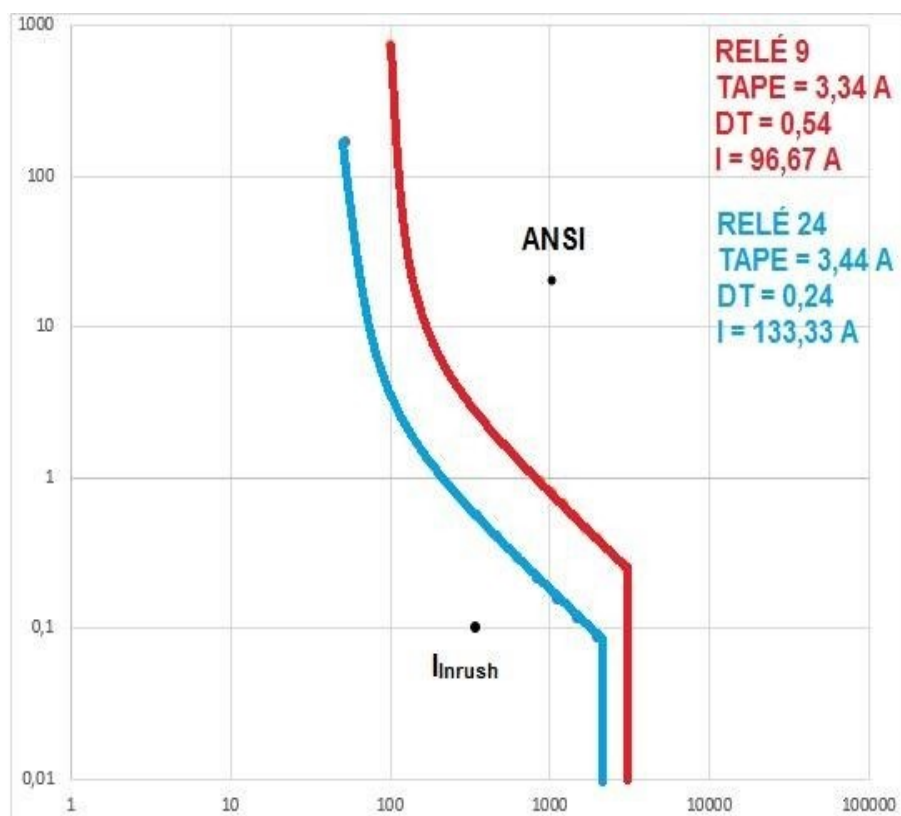
**Fonte** – Do autor

**Figura 20** - Relés 9 e 24 dispostos no diagrama unifilar



**Fonte** – Do autor

**Figura 21** - Coordenograma dos relés 9 e 21



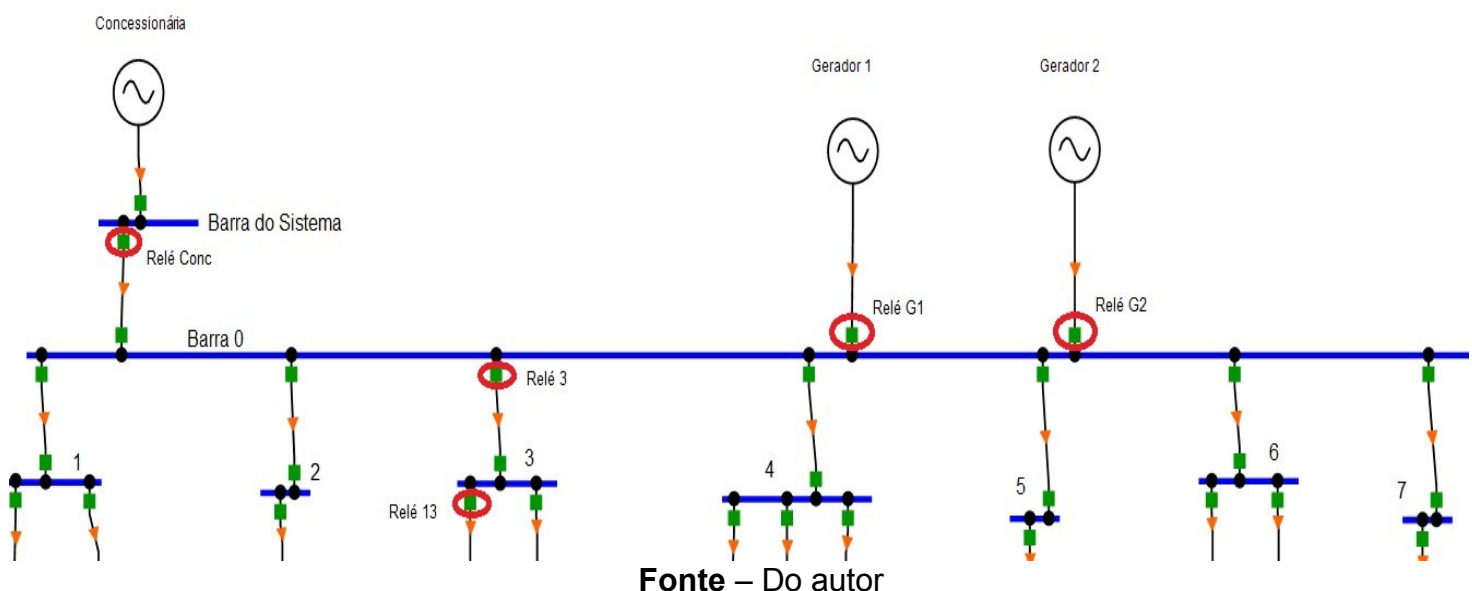
**Fonte** – Do autor

### 6.3 Relés dos geradores e da entrada da usina

Os relés que protegem os geradores e o relé da entrada da concessionária, serão os relés de retaguarda da barra com maior potência que, para o sistema em estudo, é a Barra 3. Para poder coordenar de maneira eficaz, é necessário utilizar a corrente de contribuição de cada uma dessas três fontes para o curto.

As disposições destes relés são apresentadas na Figura 22 a seguir.

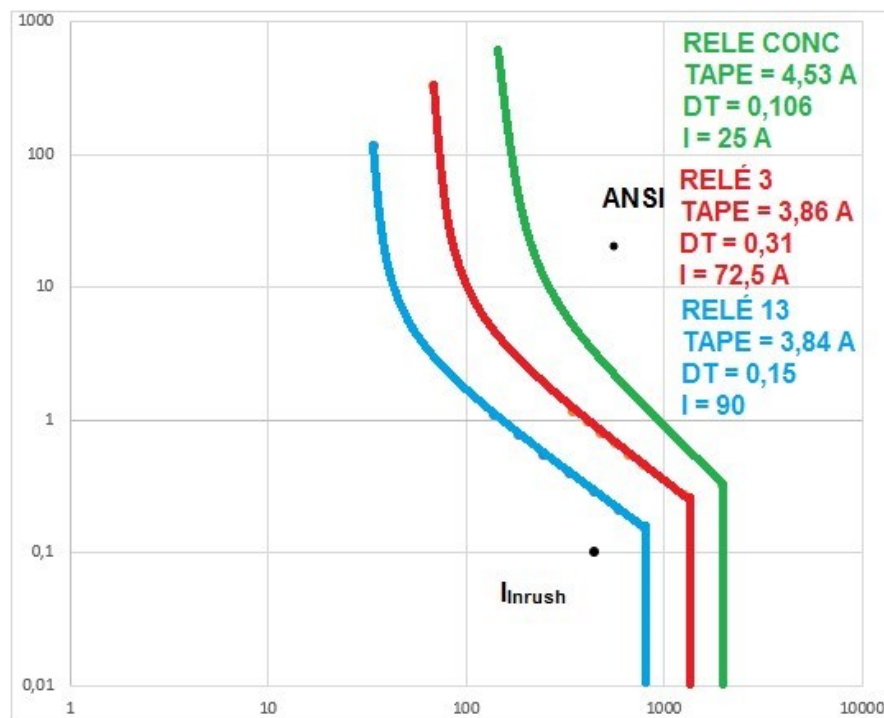
**Figura 22** - Disposição dos relés da concessionária e dos geradores no diagrama unifilar



Tomando o coordenograma dos relés 3 e 13 apresentado na Figura 9, faz-se o coordenograma dos relés dos geradores e concessionária. As correntes que estarão expostas nos gráficos a seguir, é a corrente que o relé está sentindo, que é diferente da corrente de curto total na barra. Isto se deve ao fato de existirem 3 fontes distintas alimentando o curto circuito, logo, a corrente de curto total na barra é a soma destas 3 contribuições.

Na Figura 23 a seguir, é mostrado o coordenograma dos relés 3, 13 e o relé da entrada da concessionária na usina. Porém com as correntes apresentadas neste, é a contribuição exclusiva da concessionária.

**Figura 23** - Coordenograma dos relés da entrada da usina, 3 e 13



**Fonte** – Do autor

Para os geradores, segue-se a mesma linha de raciocínio. O coordenograma será apresentado com os valores de correntes o qual o relé do gerador sente, para que assim seja possível a coordenação e ajuste do mesmo.

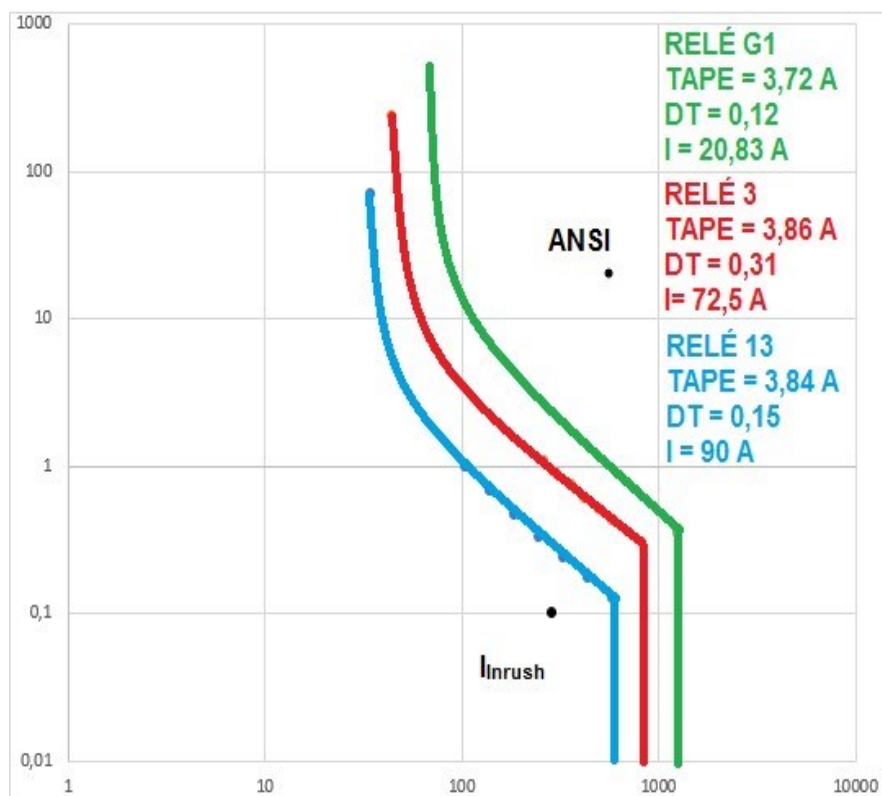
Serão mostrados os coordenogramas dos relés dos dois geradores, os quais devem interromper um mesmo curto circuito na Barra 0 simultaneamente com o relé da entrada da usina (Relé Consc).

No primeiro coordenograma, foi considerada uma corrente de interrupção igual a 2000 A no relé de entrada da usina. Essa corrente, representa um curto na Barra 0 de 4500 A. Portanto, a corrente que os geradores deverão interromper deve ser:

$$I_{G1} = I_{G2} = (I_{cc} - I_{cc})/2 = 1250 \text{ [A]}$$

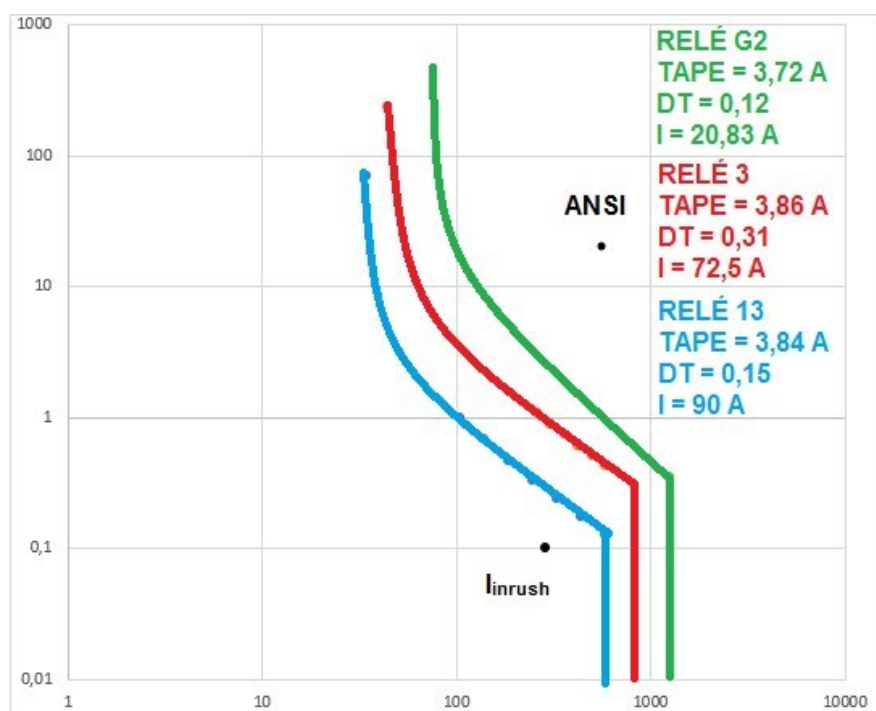
Sabendo-se disso, obtêm-se então os coordenogramas dos Relés G1, 3 e 13 como segue na Figura 24 e dos Relés G2, 3 e 13 apresentados na Figura 25.

**Figura 24** - Coordenograma dos relés G1, 3 e 13



Fonte -Do autor

**Figura 25** - Coordenograma dos relés G2, 3 e 13



Fonte – Do autor

## **7. CONCLUSÃO**

Um bom sistema de proteção deve atuar de maneira rápida e coordenada, de forma a retirar o elemento defeituoso da rede restringindo a interrupção para o mínimo de cargas possíveis. Como não há uma única maneira de proteger um sistema elétrico, cabe ao projetista decidir a melhor forma de fazê-lo.

Todos os elementos do sistema puderam ser coordenados com as curvas definidas para as cargas, sem que houvesse prejuízos à retaguarda da sua proteção.

A utilização de softwares para simulação dos curtos-circuitos e fluxo potência bem como para a criação dos coordenogramas foi de suma importância para garantir precisão e coerência nos resultados.

Para um trabalho profissional, seria necessário um estudo na própria usina do nível de curto-circuito da entrada do sistema, bem como a apresentação do diagrama unifilar precisaria de um software de desenho específico.

## **8. REFERÊNCIAS**

- Almeida, A. V. (2008). Ajuste e Coordenação de Relés de Sobrecorrente. Rio de Janeiro.
- Resende, J. W. (2009). Apostila Introdução à Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. Uberlândia.
- Rodrigues, J. M. (2013). Estudo Tutorial de Proteção de Sistemas Elétricos Industriais. Juiz de Fora.