

Instituto Superior de Engenharia do Porto



Levantamento, reparação e beneficiação do simulador  
TERCO PST 2200 do Laboratório de Sistemas de  
Energia do ISEP

Joaquim Barreto Soares Perfeito

Dissertação realizada no âmbito do Mestrado Sistema Elétrico de Energia

D1112-021

Orientadores: Engenheiro Fernando Maurício Dias  
Engenheiro Armando Herculano Ferreira

2012



# Índice Geral

Agradecimentos .....	5
Resumo.....	6
Abstract .....	7
Índice de Figuras .....	8
Siglas.....	12
Unidades.....	13
1-Introdução .....	14
1.1- Âmbito .....	14
1.2- Motivação .....	15
1.3- Estrutura.....	15
2- Descrição do simulador sistema elétrico de energia .....	17
2.1- Prefácio .....	17
2.2- Composição .....	17
2.2.1- Produção .....	17
2.2.2- Composição do painel C1 .....	19
2.2.3- Composição do painel C2.....	19
2.2.4- Composição do painel C3.....	19
2.3- Transporte .....	19
2.3- Rede Nacional de Transporte Reduzida.....	20
2.3.2- Composição do painel C4.....	21
2.3.3- Composição do painel C5.....	22
2.4- Distribuição e consumo .....	22
2.4.1- Composição do painel C6.....	23
2.4.2- Composição do painel C7.....	23
2.4.3- Composição do painel C8.....	23
2.4.4- Composição do painel C9.....	23
2.4.5- Composição do painel C10.....	23
2.5- Painéis frontais componentes e função correspondente .....	24
2.5.1- Função dos componentes do painel C1 .....	24
2.5.2- Função dos componentes do painel C2 .....	24
2.5.3- Função dos componentes do painel C3 .....	25
2.5.4- Função dos componentes do painel C4 .....	25
2.5.5- Função dos componentes do painel C5 .....	25
2.5.6- Função dos componentes do painel C6 .....	26
2.5.7- Função dos componentes do painel C7 .....	27
2.5.8- Função dos componentes do painel C8 .....	27
2.5.9- Função dos componentes do painel C9 .....	27
2.5.10- Função dos componentes do painel C10 .....	27
3- Motor DC e equipamento periférico.....	28
3.1- Descrição geral .....	28
3.2- Princípio de operação máquina DC como Motor .....	28
3.2.1- Funcionamento do ponto de vista magnético .....	28
3.2.2- Motor DC de excitação separada.....	30
3.2.3- Regulação do motor DC .....	32
3.2.4- Ensaios da característica do motor DC.....	33
3.2.5- Configuração e colocação em funcionamento do controlo da velocidade da máquina primária do grupo gerador. ....	34
3.2.6- Problemas encontrados com as ligações do motor .....	38
4- Máquina síncrona: .....	41

4.1- Funcionamento como motor .....	41
4.1.2- Potência ativa como motor .....	42
4.2- Funcionamento como alternador .....	44
4.2.1- Condições da potência de uma máquina síncrona .....	45
4.2.2- Regulação da máquina síncrona como gerador .....	52
4.2.3- Ensaio da máquina síncrona.....	53
4.2.4- Problemas encontrados nas ligações do alternador .....	56
5- Sincronismo da máquina síncrona com a rede .....	58
6- Linhas de Transporte.....	59
6.1- Característica das linhas modelo .....	59
6.1.1- Capacitância.....	59
6.1.2- Indutância .....	60
6.1.3- Impedância.....	60
6.2- Montagens práticas para teste de linhas.....	61
6.2.1- Teste de curto-circuito. ....	61
6.2.2- Teste sem carga .....	62
6.2.3- Queda de tensão na linha .....	62
6.2.4- Carga resistiva .....	63
6.2.5- Carga indutiva.....	63
6.2.6- Carga capacitiva.....	63
7- Transformadores .....	65
7.1- Designação de ligações e marcação de terminais de transformadores .....	65
7.2- Desenho de transformadores de potência trifásicos.....	67
7.3- Regulação de tensão .....	67
7.4- Transformadores de centrais de geração .....	68
8- Relés de proteção.....	69
8.1- Relé estático.....	69
8.1.1- Definições e normas .....	69
8.1.2- Estrutura mecânica.....	69
8.1.3- Tensão auxiliar.....	69
8.1.4- Princípio de operação do relé estático .....	69
8.1.5- Característica do relé direcional com tempo inverso.....	71
8.1.6- Aplicações dos relés.....	72
9- Supervisão remota e aquisição de dados dos analisadores de energia.....	74
9.1- Analisador de energia Janitza .....	74
9.2- Montagem da rede com protocolo Ethernet.....	74
9.2.1- Ligação á rede Ethernet .....	75
9.2.2- Configuração das cartas montadas no PLC .....	76
9.3- Rede Profibus.....	78
9.3.1- Introdução .....	78
9.3.2- Configuração.....	78
9.3.3- Aquisição e supervisão das grandezas elétricas em ambiente Windows. ....	84
10- Conclusões e trabalhos futuros .....	85
11- Bibliografia .....	86
12- Anexos .....	87

# Agradecimentos

Ao senhor Engenheiro Fernando Maurício Dias, pela sempre disponibilidade quando solicitado pela minha parte nas dúvidas para a elaboração geral deste trabalho e, correção do mesmo.

Ao senhor Engenheiro Armando Herculano Ferreira pelo acompanhamento e orientação de toda a parte prática laboratorial, nas muitas tardes até horas avançadas, durante vários meses, onde foi realizado grande parte deste trabalho, laboratório de máquinas elétricas do ISEP, e laboratório de sistemas elétricos de energia LSE.

Bem hajam pela compreensão, paciência e todo o apoio incondicional que me deram.

# Resumo

Este trabalho é baseado no simulador de redes PST2200 do Laboratório de Sistemas de Energia (LSE) pois está avariado com vários problemas conhecidos, designadamente:

- Defeito de isolamento (disparo de diferencial),
- Desregulação da velocidade da máquina primária (motor DC),
- Circuito de excitação da máquina síncrona inoperacional,
- Inexistência de esquemas elétricos dos circuitos do simulador,
- Medidas desreguladas e com canais de medida com circuito impresso queimado.

O trabalho executado foi:

- O levantamento e desenho de raiz (não existe qualquer manual) dos esquemas dos 10 módulos do simulador, designadamente naqueles com avaria ou com desempenho problemático a fim de que se possa ter uma visão mais pormenorizada dos circuitos e seus problemas, por forma a intervir para os minimizar e resolver,
- Foi realizado o diagnóstico de avaria do simulador e foram propostas soluções para os mesmos,
- Realizaram-se as intervenções propostas e aprovadas.

Nas intervenções realizadas, os princípios orientadores foram:

- Aumentar a robustez do equipamento por forma a garantir a sua integridade a utilizações menos apropriadas e manobras 'exóticas' próprias de alunos, que pela sua condição, estão em fase de aprendizagem,
- Atualizar o equipamento, colocando-o em sintonia com o 'estado da arte',
- Como fator de valorização suplementar, foi concebida e aplicada a supervisão remota do funcionamento do simulador através da rede informática.

Foram detetados inúmeros erros:

- Má ligação do motor de corrente continua ao variador, resultando a falta de controlo da frequência da rede do sistema,
- Ligações entre painéis trocadas resultando em avarias diversas das fontes de alimentação,
- Cartas eletrónicas de medidas avariadas e que além de se reparar, foram também calibradas.

Devido ao mecenato da empresa Schnitt + Sohn participando monetariamente, fez-se o projeto de alteração e respetiva execução de grande parte do simulador aumentando a fiabilidade do mesmo, diminuindo assim a frequência das avarias naturais mais as que acontecem involuntariamente devido a este ser um instrumento didático. Além do trabalho elétrico, foi feito muito trabalho de chaparia para alteração de estrutura e suporte do material com diferenças de posicionamento.

Neste trabalho dá-se também alguns exemplos de cálculo e simulação das redes de transporte que se pode efetuar no simulador como estudo e simulação de avarias num sistema produtivo real.

Realizou-se a monitorização de dois aparelhos indicadores de parâmetros de energia (Janitza UMG96S) através duma rede com dois protocolos ethernet e profibus utilizando o plc (Omron CJ2M) como valorização do trabalho.

# Abstract

This work is based on network simulator PST2200 the Energy Systems Laboratory (LSE) because it is broken with several known issues, including:

- Insulation fault (trigger differential)
- Deregulation of the primary machine speed of the generator
- Excitation circuit of the generator does not work,
- No electrical schematic circuit simulator,
- Measures and unregulated channels as printed circuit burned.

Was made:

- The survey and design of schemes most relevant of the simulator, particularly in modules with fault or performance problem so that we can get a more detailed circuit and its problems, to intervention in order to minimize and resolve.
- The diagnosis of malfunctioning of the simulator and proposed solutions to them.
- We carried out the proposed and approved interventions.
- In the interventions carried out, had as guiding principles:
  - Increase the robustness of the equipment in order to defend it uses less appropriate maneuvers and 'exotic' own students, who by their condition, are in the learning phase.
  - The equipment was updated, putting it in line with the 'state of the art'.
  - As a further enhancement factor, was performed the remote supervision of the operation of the simulator via a computer network.

All wiring diagrams have been designed from scratch (there is no manual) to understand the interconnection between the various devices that comprise 10 modules of the system. We detected numerous errors; bad connection from the DC motor to drive current, resulting in the lack of frequency control system network. Connections between panels exchanged resulting in several failures of power supplies, electronic charts and measures damaged beyond repair itself, were also calibrated.

Due to the patronage of the company Schnitt + Sohn participating monetarily, it was the draft amendment and relevant technical implementation of much of the simulator increases the reliability of it, thus reducing the frequency of breakdowns over the natural occurring involuntarily due to this being an instrument education. Besides the electrical work was done much work to change the sheet metal structure and material support whose position differences is reported through photography before and after.

It also gave some examples of calculation and simulation of transport networks that can make the simulator as a study and simulation of faults in a real production system.

We carried out two monitoring equipment indicators of energy parameters (Janitza UMG96S) through a network with two ethernet and profibus protocols using plc (Omron CJ2M) as recovery work.

# Índice de Figuras

Figura 1-Simulador Terco PST2200 .....	14
Figura 2- Exemplo de uma central hidráulica com dois geradores de 170MVA ligados a um transformador para um sistema de 130kV (valores de tensão do simulador) [4].....	18
Figura 3- Diagrama de blocos C1, C2, C3 .....	18
Figura 4- Exemplo de como uma central de produção de energia pode ser ligado a um sistema de transporte [4]. .....	20
Figura 5- Rede nacional de transporte reduzida [16]. .....	21
Figura 6- Diagrama de bloco C6, C7, C8 .....	22
Figura 7- Bloco logico C1, C2, C3 [4].....	24
Figura 8- Bloco lógico C6 [4]. .....	26
Figura 9- Grupo Motor DC Gerador Síncrono trifásico. ....	28
Figura 10- Motor DC [12]. .....	29
Figura 11- Circuito equivalente da máquina DC [4]. .....	29
Figura 12- Máquina DC excitação separada. ....	31
Figura 13- Curvas de carga motor excitação separada.....	31
Figura 14- Regulação de campo.....	31
Figura 15- Tensão de excitação e armadura constantes. ....	32
Figura 16- Chapa de característica do Motor DC. ....	32
Figura 17- Diagrama de blocos de variação de velocidade do motor DC [4], [8]. .....	33
Figura 18- Esquema de shunts, no painel frontal C1 .....	33
Figura 19- Velocidade em função da tensão da armadura.....	34
Figura 20- Máquina excitação separada.....	35
Figura 21- Regulação do controlador.....	35
Figura 22- Forma de onda da tensão da armadura .....	37
Figura 23- Frequência de ondulação da velocidade.....	37
Figura 24- Resposta em velocidade do arranque em carga.....	38
Figura 25- Seguimento da velocidade em relação a tensão .....	38
Figura 26- Ligação encontrada pela primeira vez do motor DC.....	39
Figura 27- Ligação depois da correção. ....	39
Figura 28- Regulação errada dos micros interruptores [8]. ....	39
Figura 29- Regulação correta dos micros interruptores [8]. ....	40
Figura 30- Curva característica binário velocidade potência consumida .....	40
Figura 31- Máquina síncrona rodando uma volta (uma fase). ....	41
Figura 32- Diagrama vetorial de um motor síncrono (uma fase). .....	41
Figura 33- Circuito elétrico equivalente e diagrama vetorial de motor síncrono. ....	42
Figura 34- Motor síncrono sincronizado para $\varphi = 0$ . ....	42
Figura 35- Motor síncrono sob magnetizado. ....	43
Figura 36- Potência de um motor síncrono em função do ângulo da carga.....	43
Figura 37- Igual a figura 30 mas agora, a máquina fornecendo energia.....	44
Figura 38- Circuito elétrico equivalente e diagrama vetorial de gerador síncrono.....	44
Figura 39- Gerador síncrono na saturação (resistência negligenciada). ....	44
Figura 40- Potência ativa Máquina síncrona.....	45
Figura 41- Máquina síncrona ideal e sobre excitada $I_m > I_{m0}$ [4]. .....	46
Figura 42- Máquina síncrona ideal e sub excitada $I_m < I_{m0}$ [4]. .....	47
Figura 43- Máquina síncrona operando com diferentes ligações de excitação [4]. .....	48
Figura 44- Máquina síncrona ideal [4]. .....	48
Figura 45- Diferentes níveis de magnetização do gerador [4]. .....	49

Figura 46- Características V e potências reativa dependendo da corrente de excitação a) [4].	49
Figura 47- Características V e potências reativa dependendo da corrente de excitação b) [4].	50
Figura 48- Característica em vazio [4].	50
Figura 49- Característica de curto-circuito [4].	50
Figura 50- Enrolamento da armadura em curto-circuito c [4].	51
Figura 51- Característica externa [4].	51
Figura 52- Característica de controlo [4].	51
Figura 53- Chapa de característica da Máquina síncrona.	52
Figura 54- Diagrama de blocos do regulador de tensão [4], [8].	52
Figura 55- Frequência do Alternador em função da tensão da armadura do motor DC.	53
Figura 56- Tensão da armadura tensão de referência 20-240VDC	54
Figura 57- Tensão da armadura tensão de referência 200-240VDC.	54
Figura 58- Esquema simplificado do gerador síncrono	55
Figura 59- Esquema da regulação do grupo gerador	56
Figura 60- Ligações trocadas na máquina síncrona.	56
Figura 61- Ligações depois da correção na máquina síncrona.	57
Figura 62- Regulação errada dos micros interruptores [8].	57
Figura 63- Regulação correta dos micros interruptores.	57
Figura 64- Exemplo de ligação de sincronismo [4].	58
Figura 65- Capacidades entre linhas e entre linhas e terra [4].	60
Figura 66- Teste curto-circuito [4].	61
Figura 67- Teste sem carga [4].	62
Figura 68- Teste queda de tensão [4].	63
Figura 69- Tipo de ligações mais usadas em transformadores trifásicos [4].	65
Figura 70- Designação de ligações de transformadores trifásicos [4].	66
Figura 71- Designação de ligações de transformadores trifásicos continuação [4].	66
Figura 72- Vários tipos de transformadores trifásicos [4].	67
Figura 73- Circuito diagrama relé de corrente [4]	69
Figura 74- Esquema de blocos de relé de sobre intensidade temporizado [4].	70
Figura 75- Circuito temporizado do relé de sobre intensidade [4].	70
Figura 76- Relé direcional de sobre intensidade temporizado [4].	71
Figura 77- Curvas corrente/tempo diferença de fase 0° [4].	71
Figura 78- Curvas corrente/tempo diferença de fase 45° [4].	72
Figura 79- Proteção da potência ativa ou reativa [4].	72
Figura 80- Proteção da corrente defeito de terra. Proteção direcional [4].	73
Figura 81- Proteção de perda de sincronismo [4].	73
Figura 82- Janitza UMG96S [1].	74
Figura 83- Rede com dois protocolos Ethernet / Profibus	75
Figura 84- Configuração rede Ethernet 1	75
Figura 85- Configuração da rede Ethernet 2	76
Figura 86- Configuração da rede Ethernet 3	76
Figura 87- Micro interruptores.	76
Figura 88- Configuração das cartas no PLC 1	77
Figura 89- Configuração das cartas no PLC 2	77
Figura 90- Ficha DB9 Profibus	79
Figura 91- Esquema de ligação do cabo de rede [2].	79
Figura 92- Dispositivos da rede	79
Figura 93- Configuração da rede	80
Figura 94- Configuração dos aparelhos escravos	80
Figura 95- Configuração da unidade Mestre.	81
Figura 96- Ligação a rede	81

Figura 97- Diagnostico do Master .....	82
Figura 98- Diagnóstico dos Escravos.....	82
Figura 99- Mapeamento dos endereços de memória CIO.....	83
Figura 100- Grandezas elétricas em ambiente Windows (visual studio).....	84

# Índice de Tabelas

Tabela 1- Característica Motor DC .....	34
Tabela 2- Modo regulação dos micros interruptores [8] .....	40
Tabela 3- Relação das Tensões da armadura - Ponte retificadora .....	53
Tabela 4- Designação das letras dos enrolamentos .....	65
Tabela 5- Mapeamento de memória CIO .....	83

# Siglas

IEC- Comissão eletrotécnica internacional  
D/Y- estrela triangulo  
DC- corrente continua  
AC- corrente alternada  
TC- turbina a carvão  
TG- turbina agás  
H- hidráulico  
W- eólico  
r- raio  
N- velocidade  
F- força  
B- densidade do fluxo magnético  
L- comprimento  
Ua- tensão na armadura  
E- força eletromotriz  
Ra- resistência enrolamento da armadura  
T- binário  
 $\Phi$ - fluxo magnético  
Vtaq- tensão do taquímetro  
f- frequência  
p- par de polos  
PI- proporcional integral  
M- motor  
G- gerador  
t- dínamo taquimétrico  
E- força eletromotriz  
X- reactância  
P- potencia ativa  
S- potência aparente  
Q- potência reativa  
cos- cosseno  
sen- seno  
 $\omega$ - velocidade angular  
c- condensador  
l- indutância  
ligação Y- ligação em estrela  
ligação D- ligação em triangulo  
ligação Z- ligação em zig-zag  
N- neutro  
t- tempo  
I/O- entrada saída  
Z- impedância  
THD- Taxa de distorção harmónica global  
THDu- Taxa de distorção harmónica em tensão  
THDi- Taxa de distorção harmónica em corrente

# Unidades

r/m- rotações por minuto  
MVA- mega volt ampere  
kV- kilo volt  
r/s- radiano por segundo  
w-weber  
Hz- hertz  
A-Ampere  
W- watt  
 $\Omega$ - ohm  
kM- quilómetro  
F- farad  
nF- nano farad  
H- henry  
seg- segundo  
kWh- quilo watt hora  
kVAr- quilo volt ampere reativo

# 1-Introdução



Figura 1-Simulador Terco PST2200

## 1.1- Âmbito

Nos dias de hoje, a simulação toma um papel muito importante no treino de pessoas em variados campos de atividade.

Com um simulador, pode-se treinar pessoas, para tomar decisões corretas debaixo de várias condições de operacionalidade. Além do mais, podemos demonstrar na prática, efeitos que previamente são estudados na teoria. Existem dois tipos de simulador: por software e hardware.

O simulador TERCO, é um simulador por hardware, desenvolvido em estreita colaboração com a ABB Suécia, de fácil manuseamento, e foi desenhado para o treino prático de engenheiros e técnicos em condições, e situações ambientes reais.

Assim, salienta-se a importância para um estabelecimento de ensino como o ISEP a mais-valia de um sistema destes, pois permite executar, vários esquemas de treino incidindo particularmente em:

- Equipas para gerir sistemas elétricos de energia.
- Operadores de produção e subestações de energia.
- Pessoal de manutenção.
- Estudantes e professores.
- Universidades e investigação.

Este trabalho consiste no levantamento do esquema e colocação em funcionamento dum simulador da marca TERCO PST 2200 existente no laboratório de Sistemas SEE de Energia do ISEP, pois encontra-se com graves problemas de operação, sem esquemas elétricos e, em suma não responde minimamente ao fim para que foi projetado e adquirido.

Um sistema elétrico de energia consiste em equipamentos de geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica.

É necessário o controlo do sistema para controlar todas as operações do referido sistema elétrico de energia e, também informação e monitorização para o supervisionar. Este simulador é um modelo de uma simples estação de potência elétrica constituído por turbina, gerador, transformador, tomadas de comutação de alta tensão, circuitos de controlo e seccionamento e duas linhas de saída.

O simulador também inclui sistema de controlo e monitorização. A secção de controlo é equipada com:

- Equipamento de controlo de tensão e frequência
- Comutadores para operar os circuitos de controlo de seccionamento
- Unidade de sincronismo
- Relés de proteção com indicação e possibilidade de teste.

- Indicadores de falta do sistema
- Instrumentos para monitorizar tensão, corrente e potência.

## 1.2- Motivação

Foi-me proposto este trabalho o qual aceitei de imediato, pois pude aplicar os meus conhecimentos práticos de vários anos incluindo cursos práticos que frequentei tanto em Portugal como no estrangeiro com os teóricos adquiridos no ISEP. Também o facto de este ser um instrumento que contribui para a mais-valia no ensino das cadeiras ligadas ao sistema elétrico de energia, podendo os alunos, colocarem por este meio, na prática vários conhecimentos teóricos na resolução de problemas que alguns deles encontrarão na sua vida profissional futura. O facto de se encontrar um mecenas para financiar o projeto de alteração para atualizar a tecnologia para uma mais recente, contribuiu para a minha motivação. De salientar também a prestimosa colaboração dos meus orientadores pois além de já serem no passado recente um deles como professor, e outro como orientador existir uma simbiose para a resolução dos vários problemas.

## 1.3- Estrutura

A estrutura deste relatório é a seguinte:

No capítulo 2, faz-se descrição do simulador elétrico de energia, que está dividido em:

Produção, onde se descreve em pormenor os painéis que o compõem C1, C2 e, C3.

Transporte, onde estão inseridas 4 unidades de linhas no painel C4 e, 3 unidades no painel C5, dá-se um exemplo da rede nacional reduzida.

Distribuição e consumo, nos painéis C6 a subestação, C7 relés de proteção e segurança, C8 carga da secção de carga da média tensão, C9 cargas monofásicas e C10 cargas trifásicas.

Faz-se também a descrição dos componentes frontais dos painéis e sua função correspondente.

No capítulo 3, faz-se a descrição da máquina primária (motor de corrente contínua de excitação separada), e sua regulação. Extraíu-se as suas funções características e fez-se a respetiva regulação através do variador de velocidade no qual foi substituído por um outro que se adapta melhor às condições requeridas. Menciona-se os problemas encontrados aquando do começo do trabalho, assim como as respetivas correções.

No capítulo 4, descreve-se o processo de reparação da máquina síncrona pois existiam graves problemas com as suas ligações além dos ensaios e as correções que tiveram de ser feitas através da parametrização do variador de tensão da excitação.

No capítulo 5, descreve-se o sincronismo do gerador com a rede.

O capítulo 6, refere-se o que respeita às linhas modelo de transporte, os conceitos básicos das características elétricas assim como montagens práticas que se podem executar para cálculo e simulador de valores e, possíveis avarias em comparação com os modelos reais.

No capítulo 7, descreve-se os vários transformadores, respetivas ligações existentes e menciona-se os que compõem o simulador em que é baseado este relatório.

No capítulo 8, descreve-se o funcionamento de alguns relés de proteção que estão implantados neste tipo de sistemas incluindo este simulador.

O capítulo 9 baseia-se no complemento e mais-valia que se adicionou a este simulador ou seja, o sistema de automação com um autómato (PLC) marca Omron e aquisição de grandezas elétricas através de dois aparelhos analisadores de energia marca Janitza. Descreve a rede que se montou com dois protocolos e sua respetiva configuração para aquisição de dados Ethernet para o sistema ser monitorizado e possível controlo á distancia, Profibus com ligação através de cabo especial para ligação do autómato aos analisadores de energia.

Também neste capítulo indica-se a programação que foi feito em visual studio da Microsoft para a

monitorização on-line das grandezas elétricas conforme perfis escolhidos para ver se os valores no respectivo barramento do simulador de energia coincidem com as respectivas experiências e cálculos. No capítulo 10 menciona-se trabalhos futuros exequíveis que devido como se percebe ao grande âmbito de matérias que versam este trabalho, pode ser aumentado conforme se vai trabalhando no hardware/software do simulador.

Junto com este relatório, entrega-se um cd com a gravação dos esquemas elétricos de todo o sistema, que foi levantado de raiz, no campo, pois não existia nada nesta matéria. O código fonte da programação em visual basic. Valores das grandezas elétricas em formato \*txt adquiridos em modbus (RS-232) entre o computador pessoal e os aparelhos analisadores de energia com o programa PSWbasic fornecido pelo fabricante, para confronto de resultados.

## **2- Descrição do simulador sistema elétrico de energia**

### **2.1- Prefácio**

Nos últimos tempos foram desenvolvidos vários equipamentos elétricos para a indústria e sistemas de energia. O equipamento eletromecânico de controlo, supervisão e proteção, foi substituído largamente por equipamento eletrónico.

Este simulador, foi projetado, no sentido de aumentar a flexibilidade, e diminuir os custos no seu acondicionamento.

A documentação da planta, desenhos e esquemas foram sistematicamente alterados para melhorar as condições de trabalho de acordo com a filosofia de trabalho do ISEP, respeitando, a normalização de acordo com IEC (Comissão Eletrotécnica Internacional).

Com estas alterações, é possível estudar, praticar, ler diagramas, testar instalações, manutenção de equipamentos de controlo supervisão e proteção.

Seguidamente, discrimina-se os diversos compartimentos que fazem parte do simulador em questão, estando divididos por painéis cujos esquemas elétricos foram desenhados todos de raiz, serão mencionadas todos os aparelhos que neles fazem parte pelo nome do compartimento.

### **2.2- Composição**

#### **2.2.1- Produção**

O simulador está por assim dizer dividido em dois grandes blocos. Estes blocos encontram-se interligados pelas linhas de transporte.

Assim o primeiro grande bloco como se pode na figura 3 é dividido por sua vez em painéis, C1, C2, e, C3 que representa a geração.

Normalmente, as centrais de produção de energia são divididas em centrais térmicas ou hidráulicas. As centrais térmicas são alimentadas a gás natural, carvão, a fuelóleo ou nucleares. Estão constantemente a ser feitas investigações para utilização de outras fontes de energia e, neste momento, a produção de energia através do vento (eólicas) e do sol, (fotovoltaicas) já são significativas. As máquinas mais utilizadas na produção de energia são os geradores síncronos trifásicos que convertem a energia mecânica em energia elétrica. Existem dois principais tipos de geradores, turbo geradores e, geradores de polos salientes. Estes últimos são os mais usados nas centrais hidroelétricas. São usadas turbinas de baixa velocidade, 60 r/m até 300 r/m. Os geradores são acoplados normalmente diretamente a turbina e, tem um grande número de par de polos. A gama de geradores varia entre os menos de 2MVA e os de mais de 400MVA.

As turbinas de vapor, por outro lado, são preferencialmente dimensionadas para altas velocidades pois operam com altas pressões e temperaturas. Os geradores são projetados para várias rotações, dependendo da frequência de trabalho e tem normalmente altas relações de potência. Existem geradores em serviço de 1500MVA. Por razões de robustez, os rotores dos turbo geradores são desenhados com forma cilíndrica e de pequeno diâmetro. São usados por exemplo nas centrais a gás, nas centrais nucleares e outras centrais térmicas.

A ligação do gerador ao sistema varia dependendo de diversos fatores. Os geradores pequenos podem ser ligados diretamente ao sistema. Vários geradores podem ser ligados diretamente a um barramento comum. Os grandes geradores são normalmente ligados a um auto transformador com ligação D/Y.

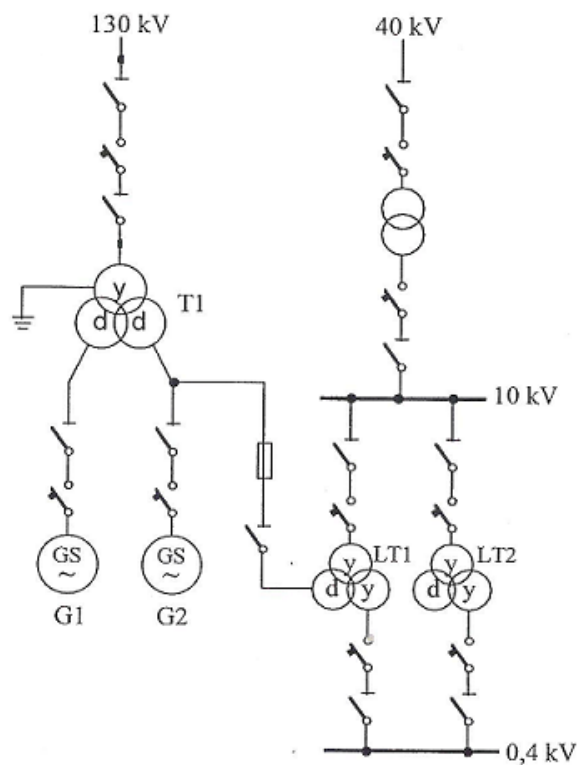


Figura 2- Exemplo de uma central hidráulica com dois geradores de 170MVA ligados a um transformador para um sistema de 130kV (valores de tensão do simulador) [4].

O modo de ligação do neutro/terra do gerador, varia conforme o sistema de proteção de relés e carta de regulação do defeito de terra. O simulador está equipado com um transformador elevador D/Y e o neutro do gerador pode ser ligado de diferentes formas: TT, TN ou IT.

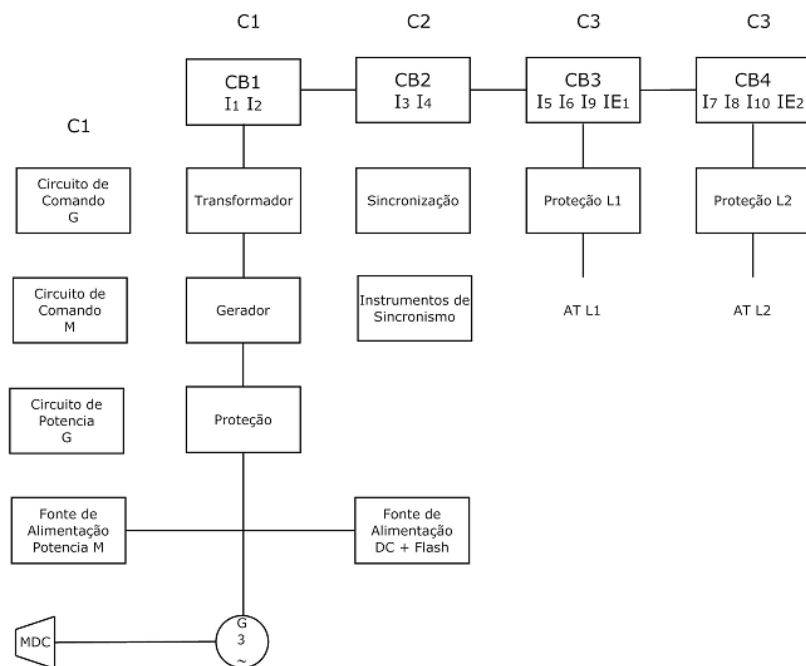


Figura 3- Diagrama de blocos C1, C2, C3

### **2.2.2- Composição do painel C1**

O painel C1, tem o objetivo do controlo, supervisão da geração de energia, assim como as fontes de alimentação DC de todo o simulador, comporta o seguinte material:

- Entrada alimentação
- Cabos do motor e gerador
- Fontes de alimentação diversas
- Conversor do motor DC
- Conversor excitação do alternador
- Circuitos de arranque
- Transformador principal
- Módulo de contactores
- Transformadores de corrente
- Transformadores de tensão
- Circuitos de medida DC
- Circuitos de medida AC
- Interruptores de operação
- Instrumentos de medida

### **2.2.3- Composição do painel C2**

O painel C2 controla os vários sincronismos do simulador e, é composto pelo seguinte material:

- Contactores do módulo de sincronismo
- Módulo de contactores
- Instrumentos de sincronismo
- Interruptores de operação
- Instrumentos de medida
- Relés de proteção
- Circuitos de medida AC

### **2.2.4- Composição do painel C3**

O painel C3 é a saída da energia para alimentar as linhas de alta tensão e, é composto pelo seguinte material:

- Interruptores de operação
- Instrumentos de medida
- Módulo de contactores
- Relés de proteção
- Circuito de medida AC

Na interligação encontram-se os modelos de linhas de transporte, divididas em dois painéis, C4, e, C5

## **2.3- Transporte**

Como a localização da unidade de geração -central de energia- está longe do consumidor de eletricidade, é necessário um sistema de transmissão para transportar a energia elétrica através de grandes distâncias. Normalmente consiste num sistema trifásico operando a 50 ou 60Hz. São usados sistemas de alta tensão podendo-se chegar aos 1000kV. A energia elétrica pode também ser transportada sob a forma de corrente contínua mas o transporte em alta tensão só é possível em limitadas extensões o que torna entre outra uma grande desvantagem.

Numa forma simples, um sistema de transmissão consiste numa linha de ligação entre a produção e o ponto de consumo. Os grandes sistemas de transmissão são sob a forma de redes em malha ou redes interligadas. Alguns sistemas operam com diferentes tensões e, nestes casos, incluem estações

de transformação para interligar os diferentes sistemas de tensão.

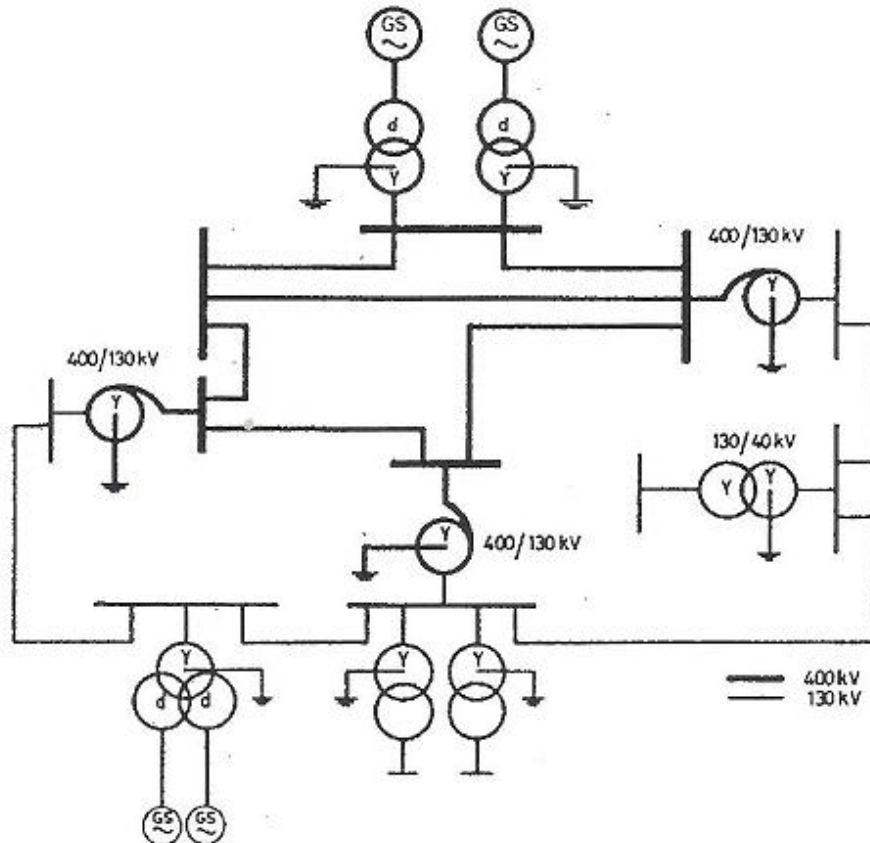


Figura 4- Exemplo de como uma central de produção de energia pode ser ligado a um sistema de transporte [4].

### 2.3- Rede Nacional de Transporte Reduzida

A área de controlo 2 da figura 5 representa um equivalente do sistema eléctrico espanhol, e da restante rede UCTE no entanto apenas se utilizou este barramento (1) pois está associado à importação/exportação Portuguesa. Neste sistema, a área de controlo 1 corresponde a uma aproximação da rede de transporte portuguesa, resultando num sistema eléctrico com três níveis de tensões, associado a um esquema de cores. Em azul estão representadas linhas e barramentos de 150kV, a cor verde representa 220kV e a cor vermelha representa 400kV.

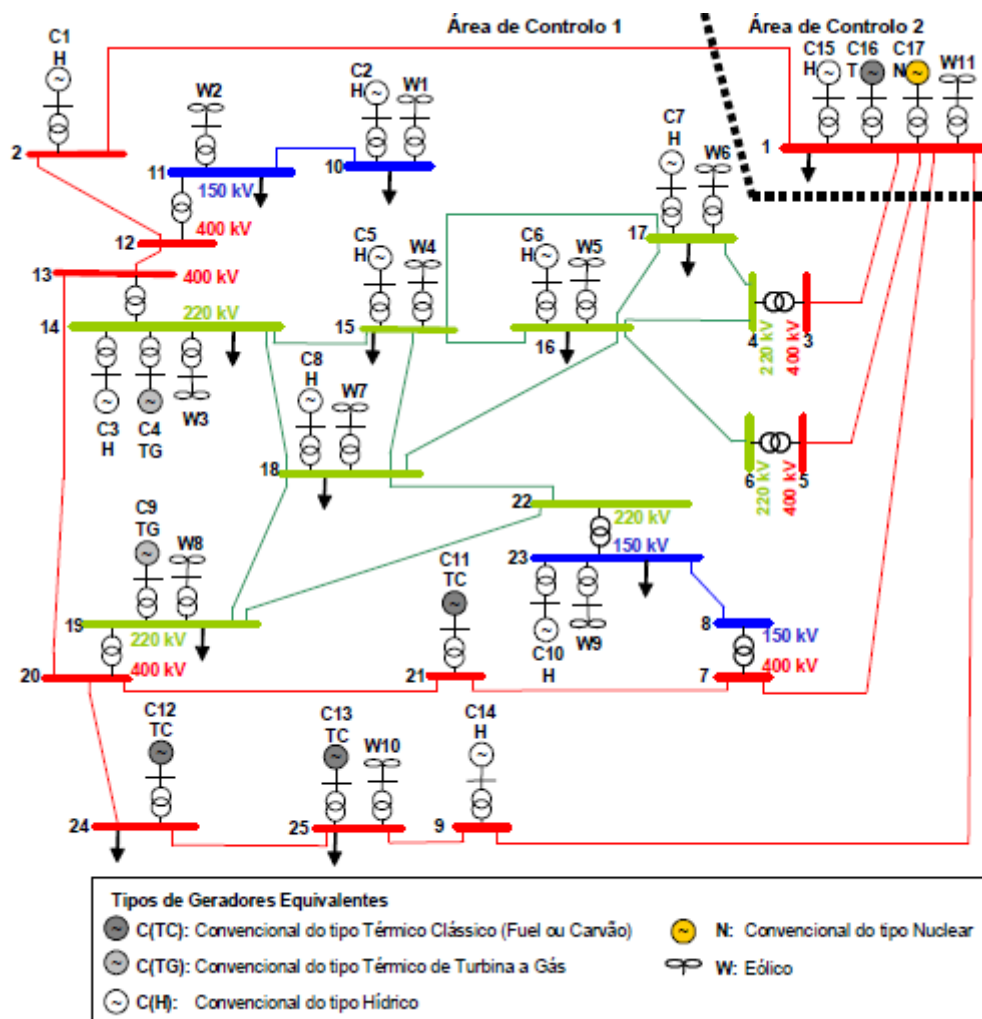


Figura 5- Rede nacional de transporte reduzida [16].

O sistema elétrico contém:

- 24 barramentos, de entre os quais, 11 abastecem a rede de distribuição
- 9 barramentos dispõem de baterias de condensadores;
- 28 linhas de transmissão, existindo a hipótese de cada uma corresponder ao equivalente de linhas em paralelo;
- 7 transformadores, existindo a hipótese de cada um corresponder ao equivalente de transformadores em paralelo;
- 14 geradores convencionais equivalentes, 3 são do tipo térmico clássico, 2 do tipo térmico de turbina a gás e 9 do tipo hídrico;
- 10 geradores eólicos equivalentes;

### 2.3.2- Composição do painel C4

Neste painel, existem componentes passivos, condensadores, resistências e indutâncias, que podem ser ligados, por meio de ligadores exteriores para simularem o funcionamento ou cálculo de linhas de transporte reais

Modelos de linhas (4 unidades)  
Módulos de ligação dos modelos de linha

### 2.3.3- Composição do painel C5

O mesmo que em 2.3.2 mas, com valores diferentes dos componentes passivos para cálculos e simulações diferentes.

Modelos de linhas (3 unidades)  
Módulos de ligação dos modelos de linhas  
Blocos primários de transferência

## 2.4- Distribuição e consumo

Geralmente refere-se a distribuição da energia elétrica desde um ponto de produção a um determinado número de consumidores. Existe alguns níveis diferentes de tensão num sistema de distribuição, numa gama cerca de 400kV até 400V ou 230V tensões nas quais a energia é consumida. Um tipo de sistema de distribuição é uma rede radial, na qual várias linhas abastecem os consumidores a partir de um simples ponto de produção. Para consumos significativos no que se refere a plantas industriais que requerem altas tensões, há diversas alternativas de abastecimento. Algumas podem ser alimentadas com equipamentos locais como geradores a diesel ou turbinas a gás. As redes de distribuição que cobrem pequenas áreas, operam normalmente com o neutro á terra com uma impedância alta, isto é, o ponto neutro dos transformadores estão ligados á terra com indutores ou resistências ou então isolados da terra, ou pode ser ligada em TT, TN ou IT. Por outro lado, os 400 – 230V tensão de abastecimento aos consumidores domésticos, os neutros normalmente, estão ligados diretamente á terra.

Nos painéis seguintes encontram-se a subestação, no painel C6 e, em C7 e C8 relés de proteção.

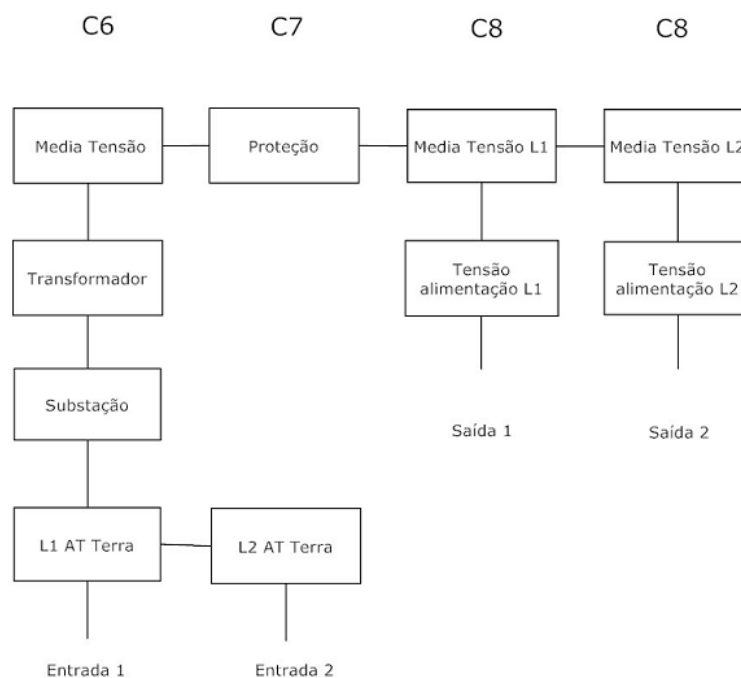


Figura 6- Diagrama de bloco C6, C7, C8

#### **2.4.1- Composição do painel C6**

O painel C6 faz a simulação da subestação em que através de um transformador e diverso material complementar, faz o abaixamento da tensão que é conduzida através das linhas de transporte e, é composto pelo seguinte material:

- IntERRUPTORES de operação
- Instrumentos de medida
- Módulo de contactores
- Circuito de medidas AC
- Transformadores de corrente
- Transformador principal da subestação

#### **2.4.2- Composição do painel C7**

Neste painel, encontram-se os aparelhos de proteção da subestação, assim como a carta lógica que comanda toda as operações inerentes e, é composto pelo seguinte material:

- Relés de proteção
- Unidade de blocos lógicos com a respetiva carta programada.

#### **2.4.3- Composição do painel C8**

Neste painel, poder-se-á simular cargas com linhas de alta tensão e, é composto pelo seguinte material:

- IntERRUPTORES de operação
- Instrumentos de medida
- Módulo de contactores
- Relés de proteção
- Circuito de medidas AC
- Transformadores de corrente
- Blocos de transferência

Por fim, nos painéis C9 e, C10 a simulação de cargas.

#### **2.4.4- Composição do painel C9**

O painel c9 é composto pelo seguinte material:

- IntERRUPTORES de operação monofásico (3\*6 peças)
- Grupos de carga resistivos monofásicos (6 unidades)
- Grupos de carga capacitivos monofásicos (6 unidades)
- Grupos de carga indutivos monofásicos (6 unidades)
- Barramento de ligação

#### **2.4.5- Composição do painel C10**

O painel C10 é composto pelo seguinte material:

- IntERRUPTORES de operação trifásico (3\*2 peças)
- Grupos de carga resistivos trifásicos (2 unidades)
- Grupos de carga capacitivos trifásicos (2 unidades)
- Grupos de carga indutivos trifásicos (2 unidades)
- Barramento de ligação

A figura 7 representa os blocos lógicos dos painéis C1, C2 e, C3

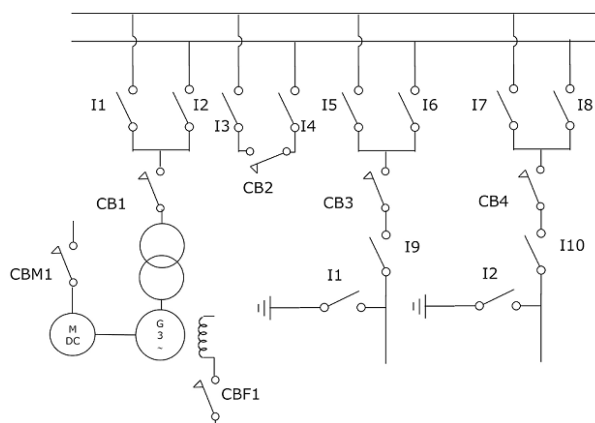


Figura 7- Bloco lógico C1, C2, C3 [4].

## 2.5- Painéis frontais componentes e função correspondente

### 2.5.1- Função dos componentes do painel C1

Na parte frontal dos painéis, estão os instrumentos indicadores das várias medidas, assim como a aparelhagem de controlo e manobra. Assim no painel C1 encontra-se o seguinte:

I1: Instrumento indicador de velocidade.

I2: Instrumento indicador corrente armadura motor DC.

I3-I6: Instrumento indicador saída tensão AC do transformador high side (400v).

I7: Instrumento indicador da corrente do estator do gerador.

I8: Instrumento indicador da tensão do gerador.

I9: Instrumento indicador da corrente de excitação (0 – 1,20 A DC). Os shunts darão 3R, 2R, O ou 0-valor resistivo em série com o enrolamento da armadura da máquina DC.

P1/P3: Curso e ajuste fino da velocidade.

P2/P4: Curso e ajuste fino da tensão (corrente da excitação).

S1: Seccionador.

S2: Seccionador.

S3: Disjuntor.

S4: Disjuntor.

S5: Disjuntor.

S6: Seletor manual/automático do controlo de velocidade.

S7: Comutador de arranque e funcionamento (START e RUN). O motor só pode arrancar na posição START. Quando atingir a velocidade desejada, o comutador deverá ser colocado para RUN.

S8: Comutador de seleção de tensão.

S9: Comutador de controlo de tensão manual automático.

S10. Stop de emergência.

S11: Interruptor de teste de lâmpadas.

S12: Interruptor RESET. Para desfazer as situações de avaria.

Entradas e saídas do transformador elevador incluindo shunts.

Entradas e saídas dos transformadores de corrente.

### 2.5.2- Função dos componentes do painel C2

Do mesmo modo que no painel C1, descreve-se a função da aparelhagem no painel frontal C2.

I1: Instrumento indicador de tensão no barramento A.

I2: Instrumento indicador de tensão no barramento B.  
I3: Instrumento indicador de tensão no lado direito e esquerdo do ponto de sincronismo.  
I4: Instrumento de sincronismo (sincronoscópio eletrônico)  
I5: Instrumento indicador de frequência no lado direito e esquerdo do ponto de sincronismo.  
L1-L3. Lâmpadas de sincronismo.  
S1: Seccionador.  
S2: Seccionador.  
S3: Disjuntor.  
S4: Comutador de seleção de tensão.  
S5/S6: Comutador de seleção de tensão.  
Relés de proteção.2.2.3 C3

### **2.5.3- Função dos componentes do painel C3**

Também no painel C3, encontram-se a aparelhagem como se descreve:

I1-I4: Instrumento indicador saída AC linha 1 (400V).  
I5-I8: Instrumento indicador saída AC linha 2 (400V).  
S1: Seccionador.  
S2: Seccionador.  
S3: Disjuntor.  
S4: Seccionador.  
S5: Seccionador.  
S6: Seccionador.  
S7: Seccionador.  
S8: Disjuntor.  
S9: Seccionador.  
S10: Seccionador.  
S11: Comutador seleção tensão.  
S12: Comutador seleção tensão.  
Relés de proteção.

### **2.5.4- Função dos componentes do painel C4**

No painel C4, estão os bornes para fazer as possíveis ligações dos componentes passivos para várias simulações possíveis.

Modelo de linhas compostas por componentes passivos com um determinado valor para simulação em determinados cenários reais de transporte

### **2.5. 5- Função dos componentes do painel C5**

Semelhante ao painel C4, a colocação dos bornes de ligação permite diversas combinações de valores de linhas de transporte.

Modelo de linhas semelhantes ao painel C4 mas com valores dos componentes passivos diferentes.

Na figura 8 representa o bloco lógico do painel C6 correspondente à subestação

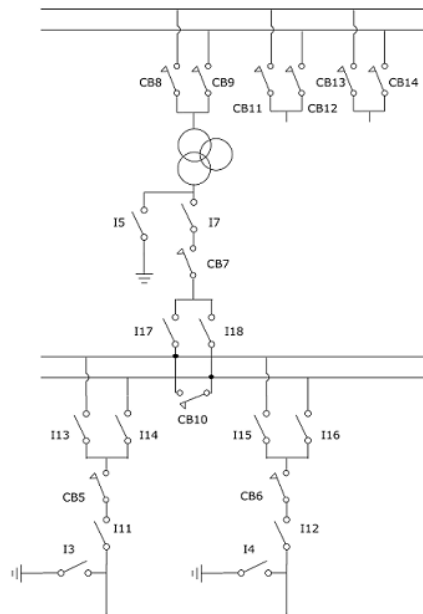


Figura 8- Bloco lógico C6 [4].

### 2.5.6- Função dos componentes do painel C6

Os instrumentos de indicação referenciados na última figura, descrevem-se como se segue:

I1-I4: Instrumento indicador de saída no transformador (400v).

I5-I8: Instrumento indicador diferença de tensão entre os barramentos A e B.

S1: Disjuntor.

S2: Disjuntor.

S3: Seccionador.

S4: Seccionador.

S5: Disjuntor.

S6: Comutador seleção tensão.

S7: Seccionador.

S8: Seccionador.

S9: Comutador seleção tensão.

I1-I4: Instrumento indicador entrada AC linha 1 high side (400v).

I5-I8: Instrumento indicador entrada AC linha 2 high side (400v).

S1: Seccionador.

S2: Seccionador.

S3: Disjuntor.

S4: Seccionador.

S5: Seccionador.

S6: Seccionador.

S7: Seccionador.

S8: Disjuntor.

S9: Seccionador.

S10: Seccionador.

S11: Disjuntor.

S12: Comutador seleção tensão.

S13: Comutador seleção tensão.

Entradas saídas dos transformadores de potência.

Entradas saídas do transformador principal da subestação.

### **2.5.7- Função dos componentes do painel C7**

A função do painel C7 é a proteção da subestação através dos respetivos relés de proteção.

### **2.5.8- Função dos componentes do painel C8**

No painel C8 encontram-se instrumentos que permitem fazer a carga direta ás linhas de alta tensão e, é composto pelo seguinte material:

I1-I4: Instrumento indicador saída AC linha 1 alimentação (400v).

I5-I8: Instrumento indicador saída AC linha 2 alimentação (400v).

S1: Disjuntor.

S2: Disjuntor.

S3: Disjuntor.

S4: Disjuntor.

S5: Comutador seleção tensão.

S6: Comutador seleção tensão.

Relés de proteção

S1. Interruptor RESET. Para desfazer as situações de avaria na subestação.

### **2.5.9- Função dos componentes do painel C9**

As cargas monofásicas que compõem o simulador.

S1,S2,S3,S4,S5,S6: Comutador de carga monofásico.

Cada um corresponde a um grupo de carga de menos de 600 ohms.

### **2.5.10- Função dos componentes do painel C10**

As cargas trifásicas que compõem o simulador.

S1,S2. Comutador trifásico de seleção de carga de 6 posições. Cada posição corresponde a aproximadamente a 25% da carga nominal.

### 3- Motor DC e equipamento periférico

O equipamento do simulador é dividido em quatro secções separadas, na qual a primeira é representada por um conversor rotativo, o turbo gerador.

O conversor rotativo consiste num motor DC e numa máquina síncrona AC trifásica montados numa mesma sapata.



Figura 9- Grupo Motor DC Gerador Síncrono trifásico.

#### 3.1- Descrição geral

A máquina DC é uma máquina de polos salientes. Os enrolamentos da excitação são colocados no estator e os enrolamentos da armadura no rotor. Para alimentar energia elétrica ao rotor é necessário escovas e um comutador.

Dependendo da ligação do enrolamento da excitação em relação a armadura, as máquinas DC são divididas em excitação separada, shunt, série ou compound.

Tal como as máquinas assíncronas de indução ou as máquinas síncronas de corrente alternada, a mesma máquina pode ser usada como motor ou como gerador [12].

#### 3.2- Princípio de operação máquina DC como Motor

##### 3.2.1- Funcionamento do ponto de vista magnético

Quando o enrolamento do rotor (figura 10), é ligado a tensão DC  $U_0$ , circula uma corrente  $i$ . O enrolamento é influenciado por uma força que pode ser expressa por [4], [12]:

$$\vec{F} = B \times i \vec{l} \quad (\text{lei de Laplace}) \quad (1)$$

Onde

B -Densidade do fluxo magnético

l- Comprimento do condutor do fluxo magnético  
(aproximadamente o comprimento do rotor)

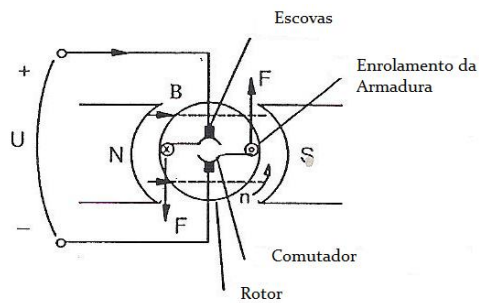


Figura 10- Motor DC [12].

O binário surge e o rotor começa a rodar.

O comutador consiste no caso mais simples, em dois segmentos de cobre isolados um do outro. Através do comutador, a corrente no enrolamento da armadura toma sempre a mesma direção quando passa pelo polo norte ou polo sul respectivamente. Quando o rotor roda, a tensão induzida, no enrolamento tem uma direção tal que tende a contrariar a do movimento. (força electro motriz f.e.m) É induzida nos condutores uma tensão:

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \text{ lei de Faraday} \quad (2)$$

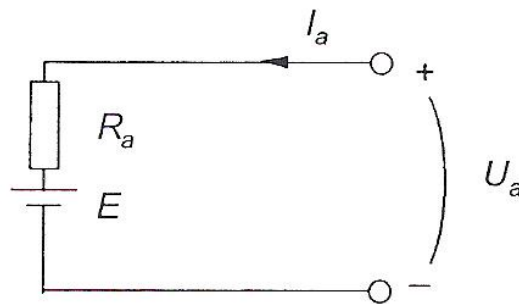


Figura 11- Circuito equivalente da máquina DC [4].

A corrente  $I_a$  que atravessa o circuito é dada pela seguinte expressão:

$$I_a = \frac{U_a - E}{R_a} \quad (3)$$

onde  $U_a$ - Tensão da armadura;

E- Força electro motriz;

$R_a$ - Resistência do enrolamento da armadura;

Se a carga no eixo do rotor aumenta, o motor tem de fornecer um grande binário que é obtido pela diminuição da velocidade. Então a E diminui, a corrente  $I_a$  aumenta e aumenta o binário.

Para ter um motor “forte” com respostas mais suaves, o rotor é equipado com várias ranhuras. Em cada ranhura, estão normalmente vários condutores que no conjunto formam uma bobine. Então, o comutador deve ser dividido em vários segmentos isolados uns dos outros.

Quando a corrente de uma bobine muda de direção, (comutação) no plano da bobine situado transversalmente ao fluxo principal do estator, não é induzida nenhuma tensão. Diz-se que a bobine

está situada no plano magnético neutro.

A corrente que atravessa as bobinas do rotor é proporcional á corrente da armadura  $I_a$ , ao fluxo magnético  $\Phi$  ( $\Phi = B \cdot A$ ) e a uma constante dependendo do comprimento das bobinas. Isto pode ser expresso como segue:

Para um binário T

$$T = K_m \cdot \Phi \cdot I_a \text{ (equação do binário)} \quad (4)$$

Onde  $K_m$  é uma constante da máquina

A f.e.m induzida E é diretamente proporcional á velocidade n, ao fluxo  $\phi$ , a algumas constantes como o número de condutores por bobine, o número de bobinas ligadas em série o comprimento dos condutores etc. Podemos escrever

$$E = K_e \cdot \Phi \cdot N \quad (5)$$

Onde  $K_e$  é outra constante da máquina

Ambos,  $K_m$  e  $K_e$  podem ser determinados por cálculos de construção ou por medidas. No entanto, para cálculos operacionais ordinários, não é de grande importância a grandeza destas constantes. Então a equação para  $I_a$  pode ser escrita

$$I_a = \frac{U_a - K_e \cdot \phi \cdot N}{R_a} \quad (6)$$

$$N = \frac{U_a - R_a \cdot I_a}{K_e \cdot \phi} \quad (7)$$

Por fim, a velocidades baixas, esta expressão deverá ser corrigida pela queda de tensão nas escovas U para obter uma maior precisão nos cálculos.

Dependendo do tipo de escovas, esta queda de tensão é aproximadamente de 1V/escova ou aproximadamente 0,3V/escova

$$N = \frac{U_a - R_a \cdot I_a - U_{escova}}{K_e \cdot \phi} \quad (8)$$

### 3.2.2- Motor DC de excitação separada

Este tipo de motor é, o que consta no simulador deste projeto razão pela qual só se explica este tipo. A bobinação da excitação, tem uma resistência muito alta (muitas espiras de fio fino) e, isso significa que a corrente de excitação  $I_m$  é pequena comparada com a da armadura  $I_a$  [4], [12].

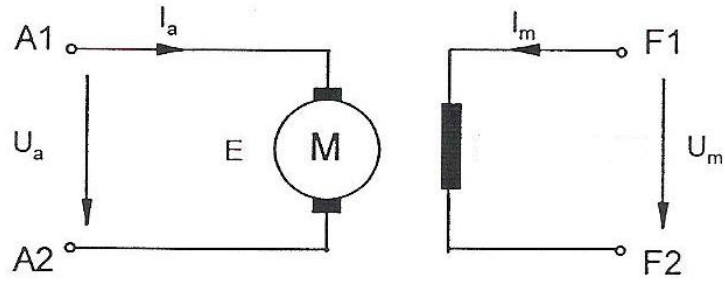


Figura 12- Máquina DC excitação separada.

Cujas respectivas curvas de carga são representadas na figura 13.

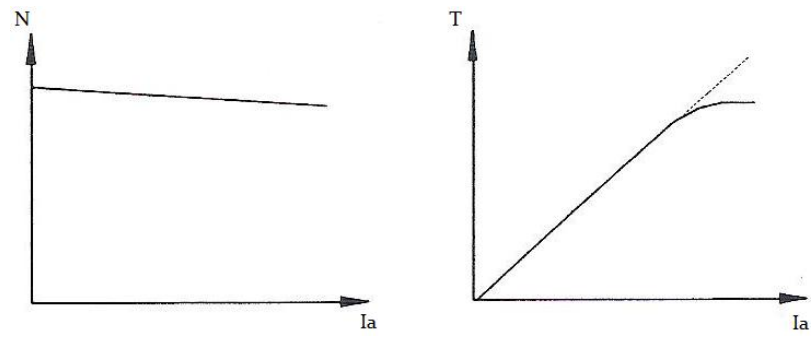


Figura 13- Curvas de carga motor excitação separada.

Quando a tensão de excitação varia e a tensão da armadura permanece constante e, por ser a magnitude do fluxo do campo magnético que varia, este tipo de regulação de velocidade é chamado de regulação do campo.

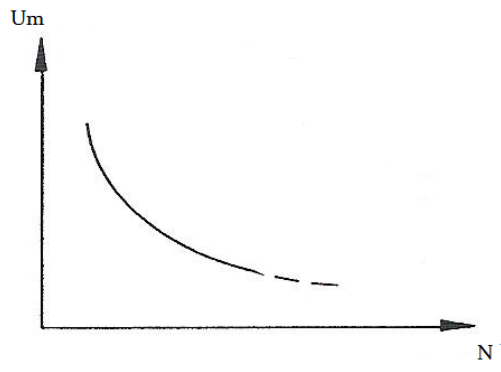


Figura 14- Regulação de campo.

Porque  $U_m$  é diretamente proporcional á corrente de excitação  $I_m$ , um decréscimo de  $U_m$ , dará um abaixamento fluxo  $\phi$  e por isso um aumento de velocidade. Porque o fluxo baixa o binário da carga baixa se  $I_a$  se manter constante. Porque  $N$  é inversamente proporcional ao fluxo, o aumento da

velocidade não será linear assim como o abaixamento do binário.

Para baixos valores de  $U_m$ , há uma tendência de embalamento do motor de acordo com a equação da velocidade. Isto significa que não se deverá colocar fusíveis no circuito de excitação.

Outro modo de funcionamento, é quando ambos tensão de armadura e tensão de excitação são constantes. Um aumento do binário da carga,  $I_a$  aumenta e  $N$  diminui ligeiramente. Da equação do binário e velocidade pode-se ver a linearidade entre ambos conforme figura seguinte.

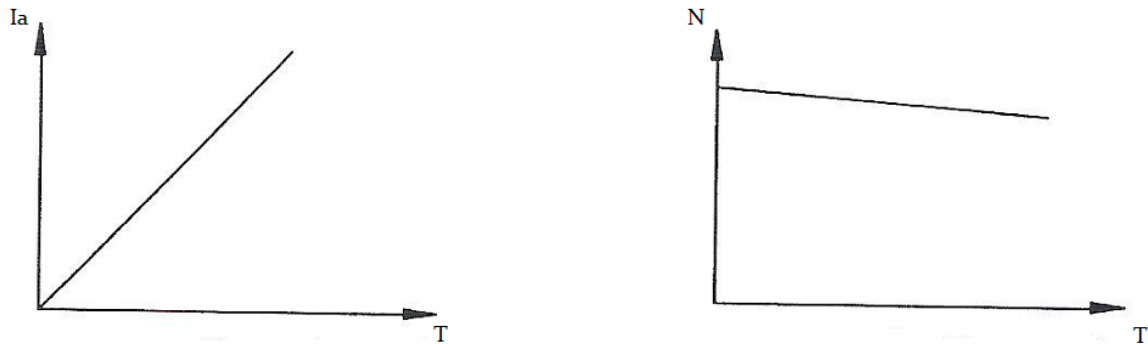


Figura 15- Tensão de excitação e armadura constantes.

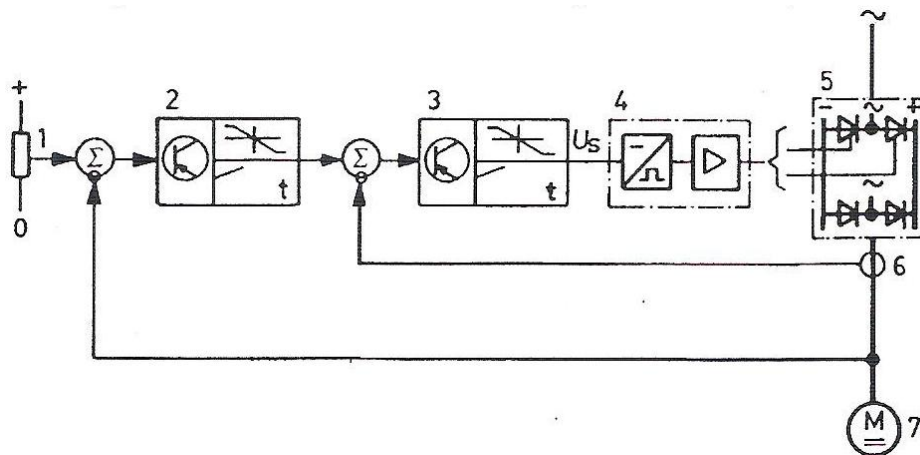
### 3.2.3- Regulação do motor DC

O motor DC do simulador é de tensão da armadura variável e 220V e de tensão de excitação constante 220V, classe de proteção IP23, conforme chapa de característica na figura seguinte, era controlado por um conversor SSD508 [8] na qual foi substituído por um conversor Parker 512C-08 [12].

DC-MACHINE		MV 1006 - 225	
Generator	1,2 kW 1400 rpm	Ser. No	2 4 3 0 8
Shunt motor	1,0 kW 1400 rpm	Temp. class	B (130 °C)
Serie motor	1,0 kW 1150 rpm	Protection class	(IP 23)
Rotor	DC 220V 6,0 A	Duty type	S2 30 min
Excitation	DC 220V 0,55 A	Norm	IEC 34 -1
TEPCO STOCKHOLM SWEDEN			

Figura 16- Chapa de característica do Motor DC.

O conversor é constituído por uma ponte de quatro tirístores regulação da armadura e quatro díodos (alimentação da excitação).



1. Potenciômetro referencia
2. Amplificador controlo tensão
3. Amplificador controlo corrente
4. Modulador impulso disparo
5. Modulo tiristor
6. Transdutor de medida
7. Motor DC

Figura 17- Diagrama de blocos de variação de velocidade do motor DC [4], [8].

A saída da tensão do conversor, é usada como sinal de valor instantâneo da tensão regulada que é comparada ao valor imposto para controlo. O sinal de erro do controlo da tensão do regulador limitado em amplitude é usado para controlo da corrente do regulador. Normalmente, este regulador trabalha como um regulador convencional de tensão da armadura mas, se a carga aumenta repentinamente, limita a corrente da armadura para prevenir uma sobrecarga do conversor [14].

Com o controlo da tensão da armadura, a velocidade, cai muito ligeiramente com o aumento do binário da carga devido á resistênciã das bobines da armadura. Esta resistênciã pode ser controlada por uns shunts no painel C1 nos bornes X10 → X7, X8, ou X9. O efeito disto é dar uma falta de controlo da característicã, isto é, um abaixamento da velocidade aumentando a carga. A configuração pode ser escolhida pelos alunos ou professor, onde se pode ver na figura seguinte, assim como em modo mais detalhado em anexo esquemas elétricos desenho 1.

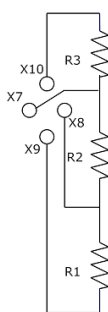


Figura 18- Esquema de shunts, no painel frontal C1

Quando o shunt é colocado na posição X10 → X9, as resistências estão fora do circuito e a velocidade é influenciada somente pela resistênciã das bobines da armadura.

### 3.2.4- Ensaio da característicã do motor DC

Este ensaio foi feito no laboratório de máquinas elétricas com uma fonte de corrente contínua, regulável, ligada á armadura do motor, com variação de 200-366VDC para monitorizar a

velocidade, através do taquímetro com característica 20VDC a 1000 r/m, em função da tensão.

Tabela 1- Característica Motor DC

$I_{exc}$ (A)	$V_{arm}$ (V)	N (r/m)	$V_{taq}$ (V)
0,39	200,0	1184	23,3
0,38	215,0	1270	25,0
0,38	233,5	1375	27,0
0,40	268,7	1566	31,0
0,40	298,0	1742	34,5
0,40	316,0	1860	36,9
0,41	336,0	1976	38,6
0,41	342,0	2017	40,0
0,41	348,0	2052	40,0
0,41	362,0	2141	42,4
0,41	366,0	2162	42,9

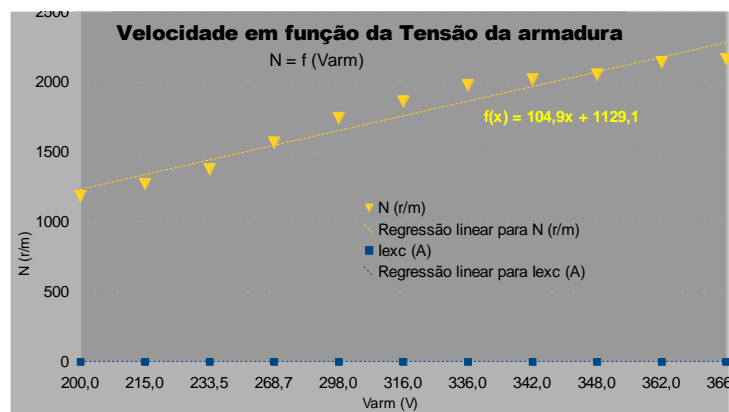


Figura 19- Velocidade em função da tensão da armadura.

### 3.2.5- Configuração e colocação em funcionamento do controlo da velocidade da máquina primária do grupo gerador.

O grupo gerador é composto por uma máquina síncrona a funcionar como gerador (alternador), a qual é acionada por um motor DC que simula uma turbina.

A frequência da senoide gerada pela máquina síncrona é diretamente proporcional à velocidade de rotação pela expressão:

$$f = \frac{p}{60} \cdot N \quad (9)$$

onde p- par de polos;

f- frequência (Hz);

N- velocidade (r/m);

Assim, impõe-se uma regulação o mais preciso quanto possível da velocidade, pois dela depende a estabilidade da frequência da rede do simulador.

O simulador (antes da intervenção) tinha uma gama de excursão da frequência entre 45 e 55 Hz que pretendemos alargar a [0...65]Hz, pelo que, de acordo com (9) e para  $p=2$ , a velocidade máxima é fixada em 1950 r/m.

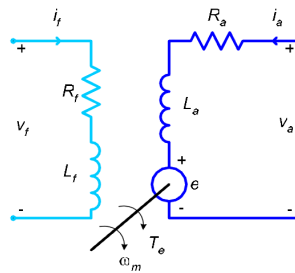


Figura 20- Máquina excitação separada

A velocidade do motor DC de excitação separada é governada pela expressão:

$$N = \frac{V_a - R_a \cdot I_a}{k_e \cdot \Phi} \quad (10)$$

onde  $V_a$ -tensão de alimentação;  
 $R_a \cdot I_a$ - queda de tensão na armadura;  
 $k_e$ - constante da máquina;  
 $\Phi$ -fluxo/excitação;

O controlador escolhido fixa a excitação ( $\Phi$ ) e controla a velocidade pela tensão da armadura ( $V_a$ ), permitindo compensar (anular) as quedas de tensão na armadura que são dependentes do ponto de carga.

Características nominais do motor:

$$V_a=220V \quad I_a=6A \quad U_e=220V \quad I_e=0,55A \quad N_n=1400r/m \quad P_n=1000W$$

A configuração do controlador compreende:

1. fixação dos limites mínimos e máximos da velocidade;
2. definição das rampas de aceleração de subida e descida da velocidade;
3. definição da corrente máxima de funcionamento;
4. ajuste da compensação das quedas de tensão ( $R_a \cdot I_a$ );
5. ajuste do zero da referência;
6. ajuste da estabilidade da resposta (PI);

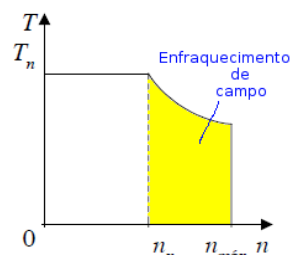


Figura 21- Regulação do controlador

Sendo a velocidade regulada pela tensão da armadura, a velocidade máxima tem de ser fixada para a tensão máxima, a tensão nominal do motor. Ora, para elevar a velocidade das 1400 r/m para ~1.850 r/m, sem ultrapassar a tensão nominal (220V), temos de atuar do lado da excitação, reduzindo a sua corrente, e colocando o motor a trabalhar na zona de enfraquecimento de campo ou potência constante.

Nesta situação o binário disponível é reduzido na proporção do aumento da velocidade, para manter o motor dentro da sua potência nominal.

Como o controlador tem tensão de saída constante e fixada pela tensão que alimenta a ponte retificadora monofásica dupla a díodos, optou-se por alimentar a ponte retificadora com uma tensão reduzida (menor que a nominal) de cerca de 84V. Isso foi obtido através de um transformador 400/175V a que se juntou um divisor de tensão de  $220\Omega/50W$ . Chegou-se a este valor, introduzindo em série com o circuito de excitação um reóstato, fixando-se a corrente de excitação em  $I_e=0,25A$ , permitindo chegar aos 1.850 r/m, que permite obter um valor ligeiramente acima dos 60Hz no gerador.

Acionou-se nos potenciômetros respetivos para que a resposta de subida e descida seja rápida sem afetar a estabilidade mecânica do conjunto motor-gerador.

A corrente máxima de funcionamento é definida no controlador por duas vias, um limite selecionável pela posição de três interruptores (S5-S6-S7), e por um potenciómetro, sendo que 100% do potenciómetro corresponde à corrente máxima do escalonamento feito pelos interruptores. No nosso caso, o controlador (PARKER 512C-08) [9] é de 8A, podendo ser escalonado para 4-6-7-8A. Como a potência nominal do motor é de 6A, escalonamos para 7A e depois reduzimos através do potenciómetro para 6A. Numa aplicação geral, em que a resposta ao arranque seja exigente, deveríamos deixar a corrente ultrapassar até 50% ou até mais, mas no caso concreto, em que o motor vai funcionar numa zona de fração da sua carga nominal, abaixo da meia-carga, o valor da carga nominal é razoável e não afeta a sua resposta a variações rápidas da referência, nem no caso do arranque.

Este ajuste foi feito aplicando carga ao motor através de um freio, e atuando no potenciómetro para que a queda da velocidade derivada da maior corrente que atravessa a armadura, provocar nestas perdas de Joule, reduzindo o binário disponível na armadura. O ajuste visa retomar a velocidade de partida, com o motor em vazio.

Visa que a tensão de saída do controlador ( $V_a$ ) seja nula quando o reóstato de referência está no seu ponto mínimo, de modo a garantir nesse estado, que o motor está parado.

A estabilidade é assegurada por um controlo Proporcional e Integral (PI), o qual atua para que o processo (velocidade) siga o mais próximo da referência (velocidade desejada), garantindo uma rápida resposta a mudanças na referência, e ausência de desvios do valor desejado, por interferência de alterações da carga ou de outra natureza. A regulação faz-se impondo variações de referência elevadas e atuando no potenciómetro disponível para o efeito, a fim de obter a mais rápida e estável convergência da velocidade para o valor pretendido (referência).

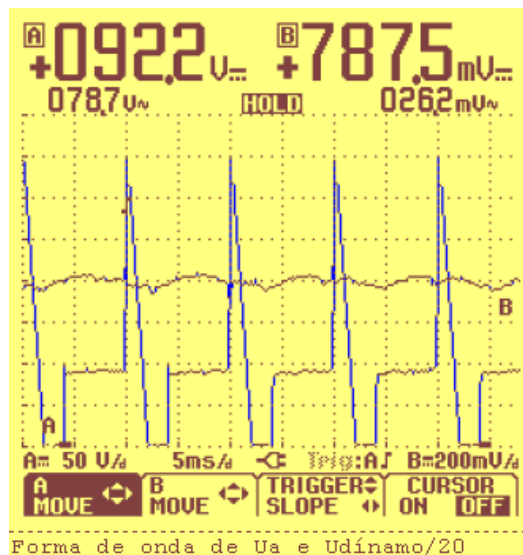


Figura 22- Forma de onda da tensão da armadura

Na figura 22 pode-se observar a forma de onda da tensão da armadura fornecida pelo controlador (a azul) e a forma de onda do dínamo taquimétrico para uma velocidade de cerca de 800 r/m. Na figura 23, vê-se a frequência de ondulação da velocidade que acompanha a frequência da tensão da armadura, a qual é proporcionada por uma ponte retificadora monofásica mista, alimentada por duas fases, resultando numa frequência dupla da frequência da rede.

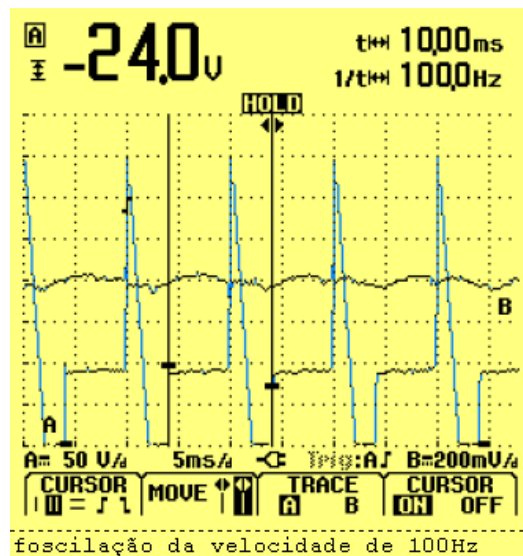


Figura 23- Frequência de ondulação da velocidade

Seguidamente, mostra-se o resultado da resposta em velocidade no arranque em carga, verificando-se a rampa de subida da aceleração limitadora da resposta (por razões de segurança), e o tempo de estabilidade da resposta de cerca de 3 segundos, até à velocidade desejada. A resposta é lenta, refletindo, por um lado o facto de estar limitada em corrente máxima e pelo facto de estar limitado em binário disponível, consequência de estar na zona de enfraquecimento de campo. Uma resposta mais rápida, neste caso não se justifica, já que sendo o equipamento onde o motor está inserido, um simulador, tanto quanto possível, se assemelhe à realidade, não seria útil reduzir demasiado, ou eliminar, a inércia de um sistema, necessariamente lento.

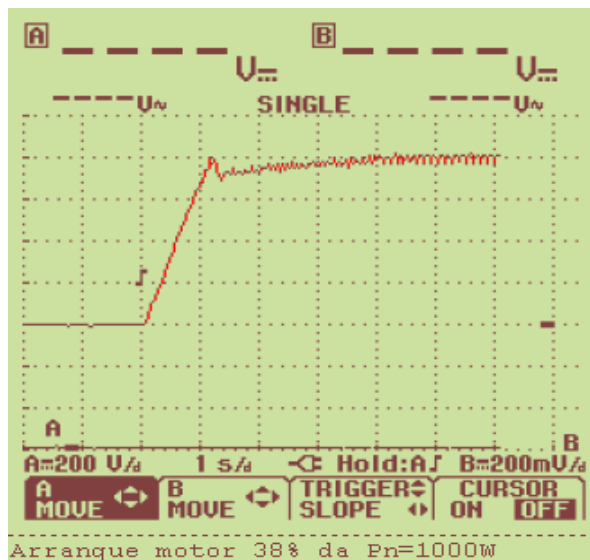


Figura 24- Resposta em velocidade do arranque em carga

Finalmente, podemos observar o seguimento da velocidade em relação à tensão, através da similitude de 'andamento' das respectivas ondas.

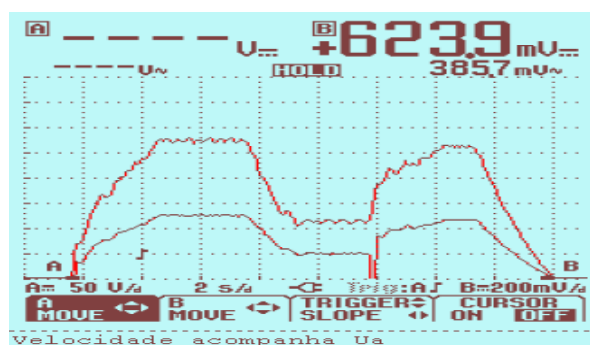


Figura 25- Seguimento da velocidade em relação a tensão

### 3.2.6- Problemas encontrados com as ligações do motor

Quando se ligou pela primeira vez a máquina primária, encontraram-se vários problemas. O variador de velocidade entrava em segurança, não era possível controlar a velocidade, e por conseguinte a frequência do alternador. Sem este problema estar completamente resolvido, era impossível continuar. Fez-se o levantamento da respetiva cablagem de ligação e, encontrou-se o esquema mostrado na figura seguinte:

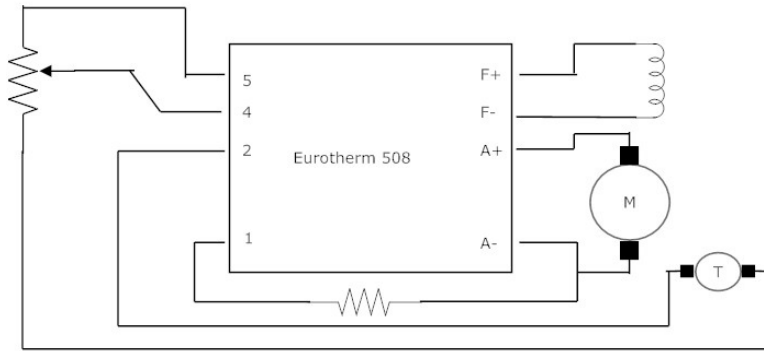


Figura 26- Ligação encontrada pela primeira vez do motor DC.

Como se pode verificar, o dínamo taquimétrico que indica a velocidade do motor dando uma indicação de tensão para o variador de velocidade manter o número de rotações quando varia a binário, está em série com o potenciómetro de referência. Por outro lado, a entrada de feedback do controlo do variador, pino 1, está ligada ao terminal A- da armadura do motor. Assim, era impossível neste sistema ter um controlo de frequência.

Executou-se as alterações necessárias e, passou a ser válido o seguinte esquema de ligações

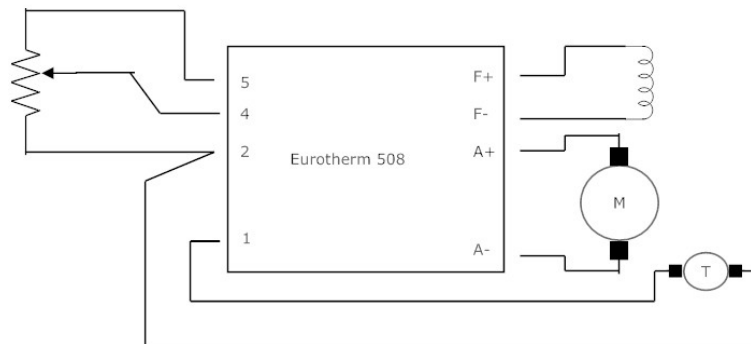


Figura 27- Ligação depois da correção.

Depois desta alteração, substituindo-se também os potenciómetros, ainda não era possível, controlar o número de rotações do motor. Depois de procurar as possíveis causas, consultou-se o manual do respetivo variador de velocidade Eurotherm 508 [8]. Este tem 4 micro interruptores para programar o modo de operação e, 7 potenciómetros de ajuste. Verificou-se que os micro interruptores estavam mal programados. Assim, só o 1 estava na posição correta. Todos os outros não correspondiam a programação desejada.

Como se encontrou

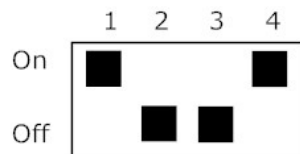


Figura 28- Regulação errada dos micros interruptores [8].

Como se programou:

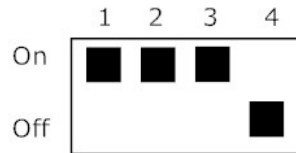


Figura 29- Regulação correta dos micros interruptores [8].

Tabela 2- Modo regulação dos micros interruptores [8]

Switches		
Switch	Off	On
SW1	Imax. 1.0 - 6.0A	Imax. 2.0 -12.0A
SW2	½ Velocidade máxima	Velocidade máxima
SW3	¼ Velocidade feedback	Velocidade feedback máxima
SW4	Feedback taquímetro	Feedback armadura

As diferenças estão evidenciadas nas figuras. Estava programado para metade da máxima velocidade e um quarto da velocidade de feedback e, o mesmo feedback não correspondia ao taquímetro mas sim da armadura.

Depois destas alterações e, ajustando os 7 potenciômetros já mencionados (ver catálogo do variador em anexo), a máquina ficou a funcionar conforme a necessidade.

Aplicou-se um binário de carga e registou-se as seguintes características de funcionamento.

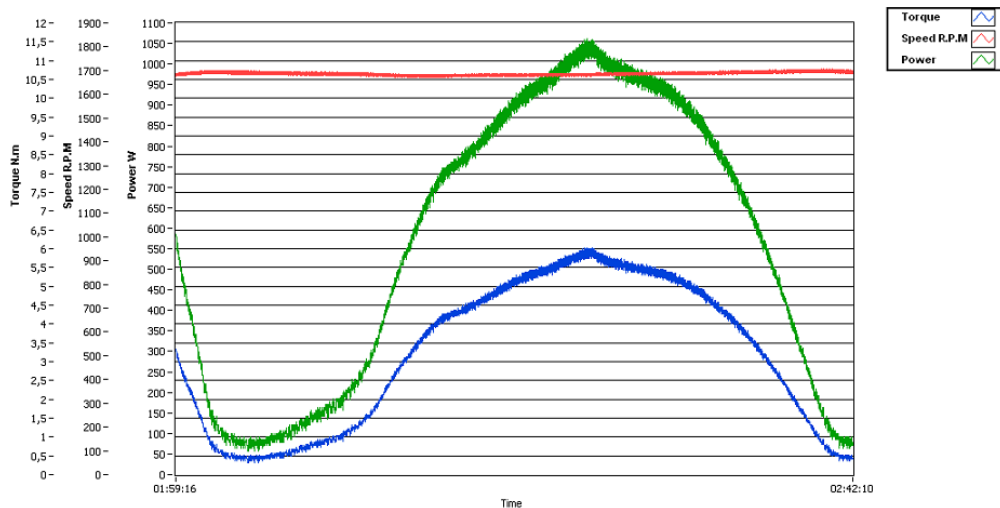


Figura 30- Curva característica binário velocidade potência consumida

Como se observa, para grandes variações do binário da carga, há muito ligeira variação da velocidade.

## 4- Máquina síncrona:

### 4.1- Funcionamento como motor

O enrolamento de estator é ligado a rede para criar um campo magnético girante [13], [4]. O rotor gira a uma velocidade de sincronismo sem qualquer carga aplicada ao veio (ideal). As perdas não são consideradas. Enquanto a máquina roda sem carga, o fluxo de excitação do rotor e o do enrolamento do estator, estão em fase. Considerando só uma fase e imaginando a máquina esplanada num plano, de acordo com a seguinte figura:

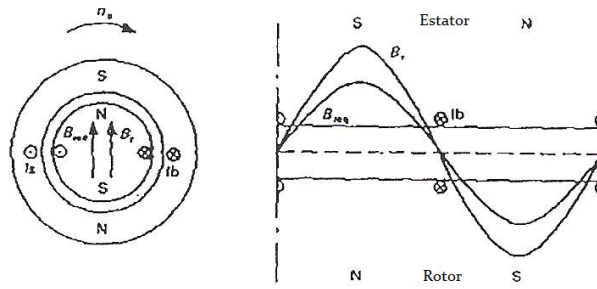


Figura 31- Máquina síncrona rodando uma volta (uma fase).

A figura mostra o momento em que a corrente através da bobina é máxima. Neste momento, o fluxo é máximo e, perpendicular ao enrolamento. Se aplicarmos uma carga mecânica ao veio do rotor, é necessário um binário para a controlar. O rotor é travado, o que causa um desfasamento entre os fluxos. Ao mesmo tempo, a corrente no enrolamento do estator cresce. Este desfasamento é representado por  $\gamma$ . Numa situação estacionária, carga constante,  $\gamma$  é constante e rotor tem a mesma velocidade em vazio. Só no momento que se liga a carga, é que ocorre uma oscilação.

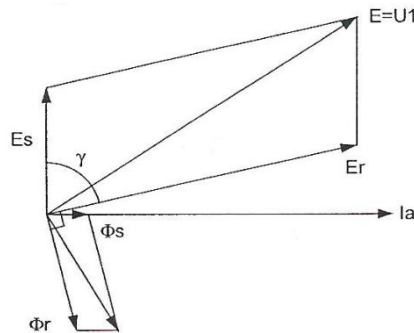


Figura 32- Diagrama vetorial de um motor síncrono (uma fase).

A corrente que passa através do enrolamento do estator é representada por  $I_a$  e é a referência na figura acima. O fluxo do estator  $\phi_s$  está em fase com  $I_a$ . A força eletromotriz do estator é representada por  $E_s$ .

Se desprezarmos a reactância estacionária e a resistência do enrolamento do estator,  $U_f = E$  e,  $\vec{E} = \vec{E}_r + \vec{E}_s$ , onde  $E_r$  = força eletromotriz induzida.  $E_s$  força eletromotriz do estator.

$E_s$  está sempre em atraso  $90^\circ$  em relação a corrente  $I_a$ .  $E_s$  é diretamente proporcional a  $I_a$ .  $E_s$  pode ser representada pelo produto de uma reactância pela corrente  $I_a$ . Chama-se esta reactância de reactância principal de sincronismo e é representada por  $X_m$ .

Pode ser representada pela seguinte fórmula:

$$E = E_r + X_m \cdot I_a \quad (11)$$

A resistência  $R_a$  e a reactância  $X_a$  do enrolamento do estator também tem se ser levadas em consideração e, temos

$$E = E_r + R_a \cdot I_a + (X_a + X_m) \cdot I_a \quad (12)$$

Á soma  $X_a + X_m$  chamamos reactância síncrona e é representada por  $X_d$ . Agora podemos representar o circuito elétrico equivalente para uma fase do motor síncrono

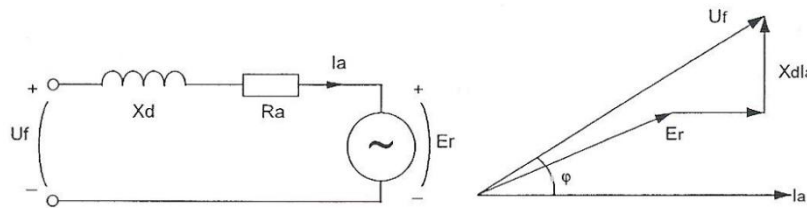


Figura 33- Circuito elétrico equivalente e diagrama vetorial de motor síncrono.

Para o cálculo,  $R_a$  pode ser desprezada em relação a  $X_d$ . Pelo ponto de vista elétrico, as forças eletromotrizes e as forças contraelectromotrizes, atuam contra a tensão. Se olharmos o motor de indução sob este ponto de vista, é talvez mais simples percebermos o porque do fluxos  $\phi_s$  e  $\phi_r$  estarem em atraso  $90^\circ$  em relação as forças eletromotrizes no diagrama vetorial. A magnitude de  $E_r$ , depende da magnitude do fluxo que pode variar alterando a corrente de excitação da bobinagem do rotor.  $E_s$  é uma força eletromotriz que depende da corrente do estator e da carga mecânica do rotor. Dependendo do desenho da máquina,  $X_d$  varia entre  $0,5 \cdot \frac{U_f}{I_{an}} \leq X_d \leq 2 \cdot \frac{U_f}{I_{an}}$  Onde  $U_f = \frac{U_n}{\sqrt{3}}$ .

$U_n$  = tensão composta e  $I_{an}$  = corrente composta.

Em relação ao ângulo de defasamento  $\phi$ , a sua amplitude depende das condições reativas da máquina. Escolhendo uma variação do valor da corrente de excitação  $I_a$  no circuito do rotor ficaremos com na figura seguinte  $\phi = 0$

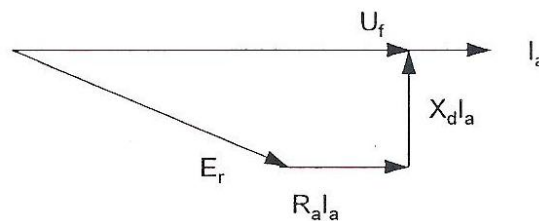


Figura 34- Motor síncrono sincronizado para  $\phi = 0$ .

#### 4.1.2- Potência ativa como motor

Para uma potência trifásica aplica-se:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_a \cdot \cos\phi \quad (13)$$

$$P = 3 \cdot U_f \cdot I_a \cdot \cos \varphi \quad (14)$$

$$P = 3 \cdot E_r \cdot I_a \cdot \cos (\varphi - \theta) \quad (15)$$

$$U_f \cdot \text{sen } \theta = X_d \cdot I_a \cdot \cos (\varphi - \theta) \quad (16)$$

$$P = \frac{3 \cdot E_r \cdot U_f}{X_d} \cdot \text{sen } \theta \quad (17)$$

Se desprezarmos as perdas. O binário pode ser calculado por

$$T = \frac{P}{\omega_s} = \frac{3 \cdot E_r \cdot U_f}{\omega_s \cdot X_d} \cdot \text{sen } \theta \quad (18)$$

Onde

$$\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot N_s, \text{ (Ns em r/s)} \quad (19)$$

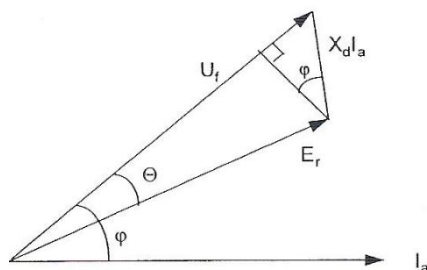


Figura 35- Motor síncrono sob magnetizado.

Como se pode ver, para uma dada tensão composta, há uma dada excitação  $E_r$  em algumas máquinas, é função somente do chamado ângulo de carga  $\theta$ .

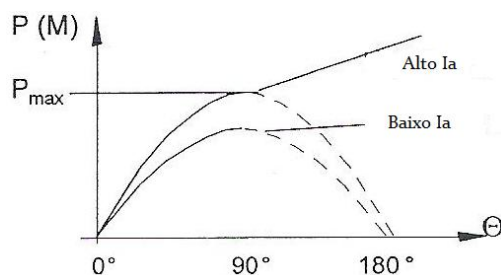


Figura 36- Potência de um motor síncrono em função do ângulo da carga.

Um funcionamento estável do motor é alcançado se  $0 \leq \theta \leq 90^\circ$ .

$E_r$  é função do fluxo  $\phi$  que por sua vez depende da corrente  $I_a$ . Devido a saturação do ferro, o valor de  $\phi$  é limitado.

## 4.2- Funcionamento como gerador

O rotor gira a uma velocidade síncrona. Permanecem as mesmas condições da figura 31. Se fornecermos ao veio da máquina uma potência mecânica, esta potência aumenta a velocidade de rotação e acelerará o rotor. Mesmo nestas condições, aparece a diferença de fases entre os fluxos mas em sentido inverso comparado com a situação anterior. O ângulo  $\gamma$  vem negativo. A corrente do estator aumenta e é fornecida potência [13], [4].

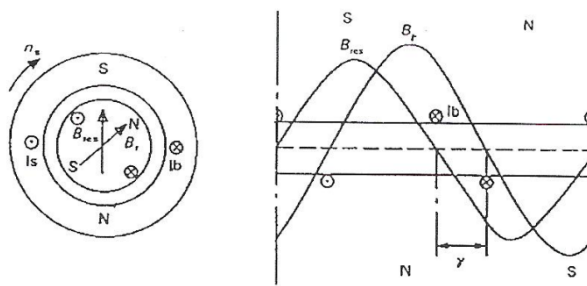


Figura 37- Igual a figura 31 mas agora, a máquina fornecendo energia.

Mesmo nestas condições, aplica-se na mesma, a equação do binário, só que T vem com sinal oposto porque  $\gamma$  é negativo pela oposição das potências.

$$T = K \cdot B_{res} \cdot B_r \cdot \text{sen}\gamma \quad (20)$$

Como gerador, é prático definir a direção da corrente, de acordo com a corrente de alimentação.

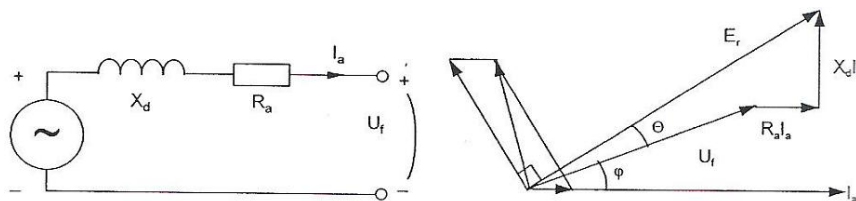


Figura 38- Circuito elétrico equivalente e diagrama vetorial de gerador síncrono.

O fluxo  $\phi_r$  induz uma tensão sinusoidal  $E_r$  no enrolamento do estator. Esta tensão está em atraso  $90^\circ$  em relação ao fluxo. A corrente da armadura, (corrente do estator)  $I_a$  cria um fluxo  $\phi_s$  na mesma fase que  $I_a$ .

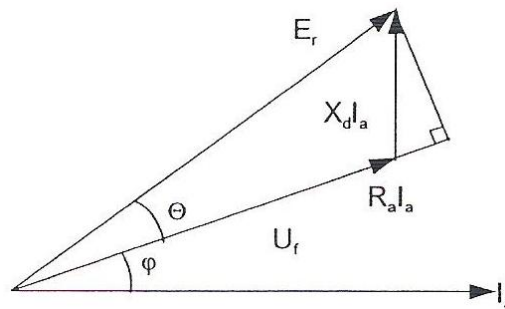


Figura 39- Gerador síncrono na saturação (resistência negligenciada).

Pelo diagrama vetorial, da figura tiramos

$$P = 3 \cdot U_f \cdot I_a \cdot \cos \varphi = 3 \cdot E_r \cdot I_a \cdot \cos(\varphi + \theta) \quad (21)$$

$$P = \frac{3 \cdot E_r \cdot U_f}{X_s} \cdot \text{sen } \theta \quad (22)$$

Mas, agora  $\theta$  é negativo comparado com o caso do motor. ( $E_r$  antes de  $U_f$ ) a potência tem uma direção oposta comparado com o motor. Então, o regime de trabalho do gerador será estável entre  $-90^\circ \leq \theta \leq 0^\circ$

#### 4.2.1- Condições da potência de uma máquina síncrona

Pelo que foi dito anteriormente podemos juntar o funcionamento do motor e gerador na figura seguinte

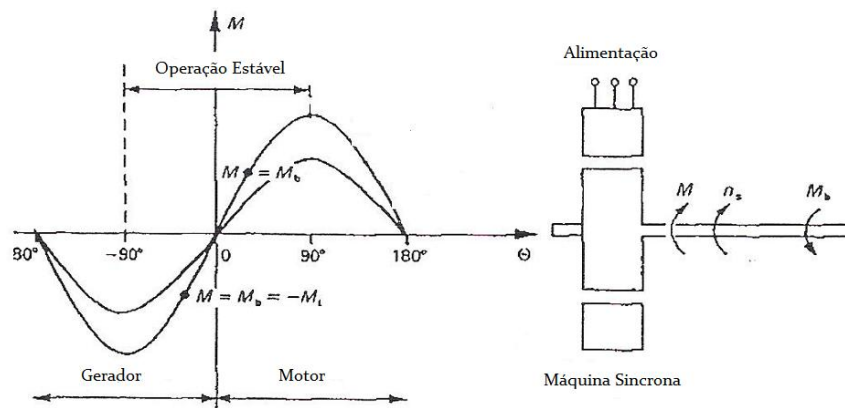


Figura 40- Potência ativa Máquina síncrona.

$0^\circ < \theta < 180^\circ$  P e T Positivos operação como motor  
 $-180^\circ < \theta < 0^\circ$  P e T negativos operação como gerador

Assume-se que a máquina opera como motor com  $\theta = 90^\circ$ . Se o binário da carga aumenta,  $M_b > M_{max}$ ,  $\theta$  aumenta mas  $M$  diminui. Temos um binário que tende a diminuir com a velocidade de rotação do rotor, em virtude de  $\theta$  diminuir cada vez mais Isto significa que se perdeu o sincronismo e há um desfasamento. Com desfasamento há uma corrente de curto-circuito (ainda que limitada pela reactância síncrona que é relativamente grande) e a existência de relés ou outro equipamento similar normalmente desligam a máquina da alimentação. Mesmo que o binário da carga seja menor que  $M_{max}$ , a operação entre  $90^\circ < \theta < 180^\circ$  torna-se instável. Considerando que o binário da carga seja constante (independente da velocidade) e menor que o binário máximo  $M_{max}$ .

A tendência de aumento de velocidade dá um binário maior e um binário de rede aumenta a velocidade ainda mais. Isto significa que  $\theta$  diminui e há uma mudança automática da zona estável junto com o ponto de funcionamento e obtém-se  $M = M_b$

Ligando o veio da máquina a uma turbina, obtém-se um binário mecânico  $M_b$  e P negativo. Então, o binário da turbina  $M_t = -M_b$ . Se aumentarmos  $M_t$  o rotor aumenta a velocidade e o ângulo da carga  $\theta$  torna-se mais negativo. Para um certo valor de  $\theta$ , no intervalo  $-90^\circ \leq \theta \leq 0^\circ$ , vem  $M = -M_b$  (figura 39). Este é o ponto estável de funcionamento. A potência máxima do gerador, obtém-se a  $\theta =$

90°. Se aumentar mais o binário da turbina, a velocidade e a potência de alimentação aumenta e perde-se a velocidade de sincronismo. Examinando um ponto de funcionamento na região entre  $-180^\circ < \Theta < -90^\circ$ , observa-se mesmo aqui um funcionamento instável neste intervalo.

Na prática a carga muda frequentemente. Existe oscilações da velocidade do rotor em relação a velocidade de sincronismo, antes de fixar um novo valor de  $\Theta$ . Estas oscilações, refletem-se na frequência de alguns Hz. Para amortecer estas variações de velocidade, os polos do rotor podem ser equipados com bobines de amortecimento.

Com variações maiores da carga, as oscilações podem ser momentaneamente grandes  $\Theta > 90^\circ$  que a máquina pode entrar em sobrecarga. O valor limite  $\Theta = \pm 90^\circ$  corresponde ao máximo valor do efeito e do binário. E é chamado limite de estabilidade estático.

Normalmente a potência ativa é suposta ser positiva tanto no caso de funcionamento como motor e gerador. No caso de gerador, fornece energia a rede e no motor tira energia da rede. Normalmente, a máquina síncrona funciona tanto como gerador como motor.

Imaginando uma máquina síncrona ideal, potência ativa nula e excitada de tal forma que esta é absorvida toda pelo circuito do rotor. A máquina é ligada á rede com uma tensão de fase  $U_f$ . Isto significa que a corrente  $I_a = 0$ , e  $E_r = E_f$ . A corrente de excitação neste caso é representada por  $I_{m0}$ . Se a potência ativa é a mesma da potência do rotor e negligenciam-se as perdas, a potência é zero e nada acontece. Então  $E_r$  aumenta tal que  $E_r > U_f$ . Como gerador, vem  $E_r = U_f + X_d \cdot I_a$

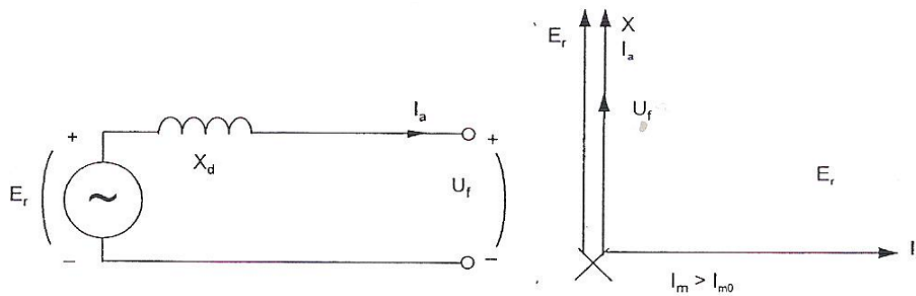


Figura 41- Máquina síncrona ideal e sobre excitada  $I_m > I_{m0}$  [4].

A máquina síncrona neste caso sobre excitada fornece energia reativa e rede. Podemos dizer que a máquina atua como um condensador. A energia que a rede obtém é calculada como:

$$Q = 3 \cdot U_f \cdot I_a \cdot \text{sen } 90^\circ \quad (23)$$

As máquinas com as cargas ativas e reativas, com um ângulo de fase  $\varphi$  e sobre excitadas obtemos uma expressão que mostra como a potência reativa depende do ângulo da carga.

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_a \cdot \text{sen } \varphi = 3 \cdot U_f \cdot I_a \cdot \text{sen } \varphi \quad (24)$$

$$U_f \cdot \text{sen } \varphi = E_r \cdot \text{sen}(\theta + \varphi) - X_d \cdot I_a \quad (25)$$

$$Q = 3 \cdot E_r \cdot I_a \cdot \text{sen}(\theta + \varphi) - 3 \cdot X_d \cdot I_a^2 \quad (26)$$

$$E_r - U_f \cdot \text{cos } \theta = X_d \cdot I_a \cdot \text{sen}(\theta + \varphi) \quad (27)$$

$$\text{sen}(\theta + \varphi) = \frac{E_r \cdot U_f \cdot \text{cos } \theta}{X_d \cdot I_a} \quad (28)$$

$$Q = \frac{3.Er^2 - 3.Uf.cos\theta - 3.(Xd.Ia)^2}{Xd} \quad (29)$$

$$(Xd.Ia)^2 = Er^2 + Uf^2 - 2.Uf.Er.cos\theta \quad (30)$$

$$Q = \frac{3.Er.Uf.cos\theta}{Xd} - \frac{3Uf^2}{Xd} \quad (31)$$

Se  $I_m < I_{m0}$  a máquina está sob excitada. A corrente fica em direção oposta comparada com o ultimo caso e operando como motor aplica-se

$$Uf = Er + Xd.Ia \quad (32)$$

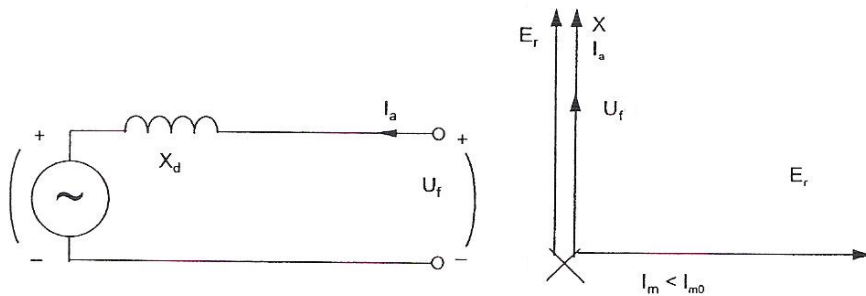


Figura 42- Máquina síncrona ideal e sub excitada  $I_m < I_{m0}$  [4].

Quando a máquina consome energia reativa da rede, atua como um indutor. A energia que a rede fornece é dada por:

$$Q = 3.Uf.Ia .sen90^0 \quad (33)$$

Quando a máquina está sob excitada, a potência reativa depende do angulo da carga de acordo com a fórmula:

$$Q = \frac{3.Uf^2}{Xd} - \frac{3.Er.Uf.cos\theta}{Xd} \quad (34)$$

Uma máquina síncrona opera como motor se consome energia da rede e, opera como gerador se fornece energia a rede.

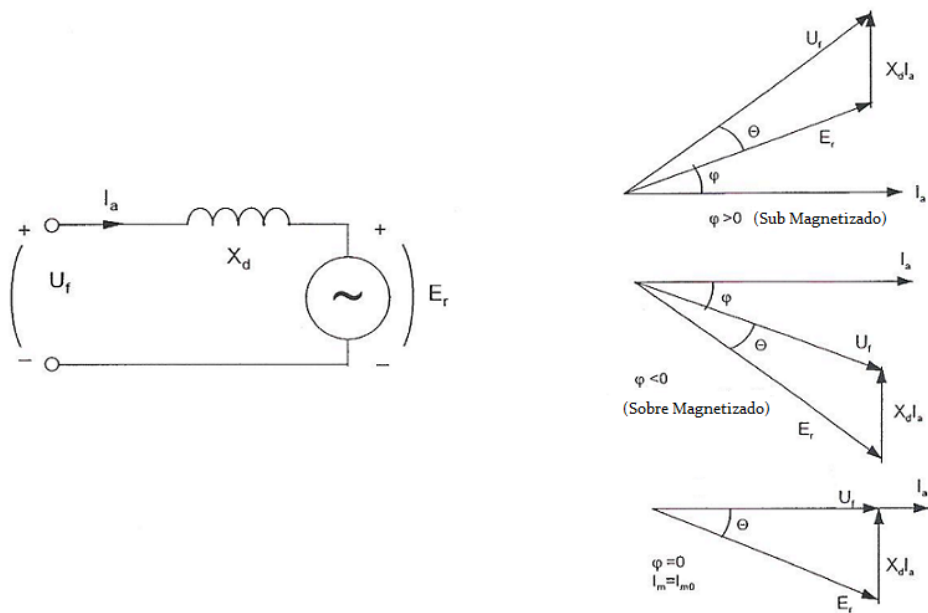


Figura 43- Máquina síncrona operando com diferentes ligações de excitação [4].

Operação como motor ( $\Theta > 0$ ) figura 43

A potência ativa P: positiva (consumida da rede)

A potência reativa Q: positiva com sub excitação a potência reativa é consumida da rede (indutor),  
 Negativa quando sobre excitação a potência reativa é fornecida a rede (condensador).

Operando como motor o vetor  $U_f$  está sempre em atraso em relação  $E_r$ .

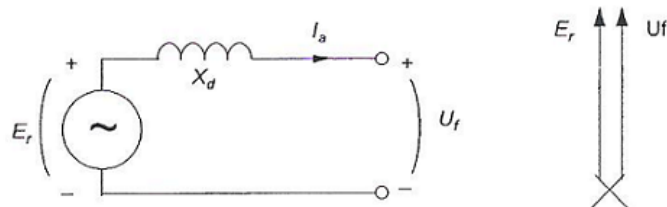


Figura 44- Máquina síncrona ideal [4].

Ideal:  $\Theta = 0$   $E = U_f$   $I_a = 0$   $I_m = I_{m0}$   $P = 0$   $Q = 0$

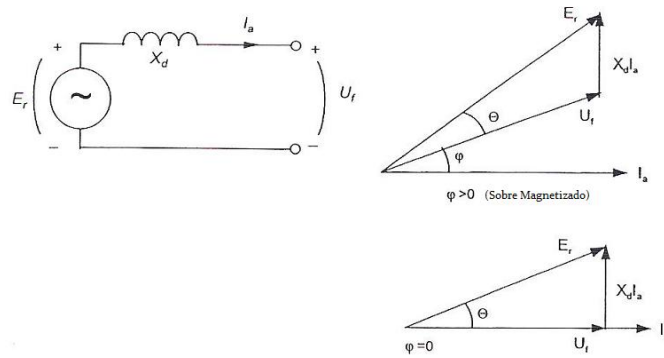


Figura 45- Diferentes níveis de magnetização do gerador [4].

Operação como gerador ( $\Theta < 0$ ) figura 44.

A potência ativa P: positiva (fornecida a rede)

A potência reativa Q: positiva com sobre excitação a potência reativa é fornecida a rede (condensador).

Negativa quando sub excitação a potência reativa é consumida da rede (indutor).

Operando como gerador vetor  $E_r$  está sempre em atraso em relação  $U_f$ .

A potência ativa numa máquina síncrona é determinada totalmente pela potência mecânica do veio e não é influenciada por variações da tensão da rede, a excitação  $E_r$ , ou a potência reativa Q. Isto é aplicado a ambos, motor e gerador. O ângulo da carga é determinado pela potência ativa e portanto é o balanço entre as potências mecânica e elétrica.

Numa rede de distribuição há diversas cargas a consumirem energia reativa, e, por isso os geradores estão ligeiramente sobre excitados. A excitação é calculada para certos pontos de referência na rede estarem aproximadamente constantes. A tensão de regulação é feita através de reguladores de tensão dos geradores. Os reguladores de tensão controlam a corrente de excitação do gerador.

As propriedades operacionais podem ser sintetizadas num número de curvas características. As mais importantes, obtêm-se quando a máquina está em fase com a rede com tensão constante e são chamadas curvas V figuras 46 e 47 onde mostra  $I_a = f(I_m)$  a diferentes valores de P e  $Q = f(I_m)$ .

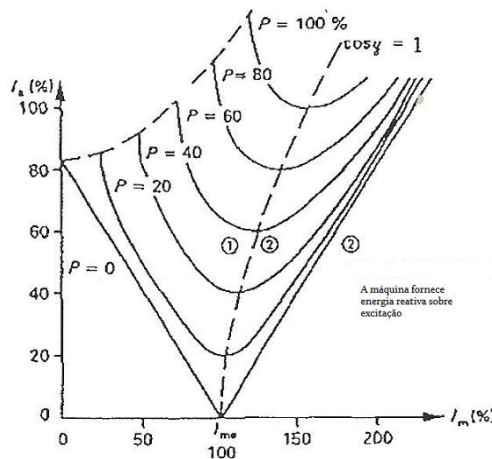


Figura 46- Características V e potências reativa dependendo da corrente de excitação a) [4].

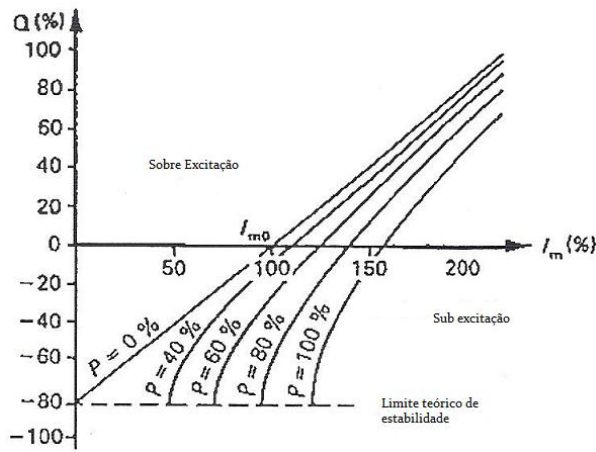


Figura 47- Características V e potências reativa dependendo da corrente de excitação b) [4].

As correntes da armadura e do rotor devem ser limitadas.

Se a corrente da rede for interrompida a máquina síncrona roda livremente. A máquina torna-se interessante somente como gerador.

Se a máquina trabalha sem carga, a velocidade constante e,  $I_m$  variar, a curva ideal será a seguinte de acordo com a fig. 48.

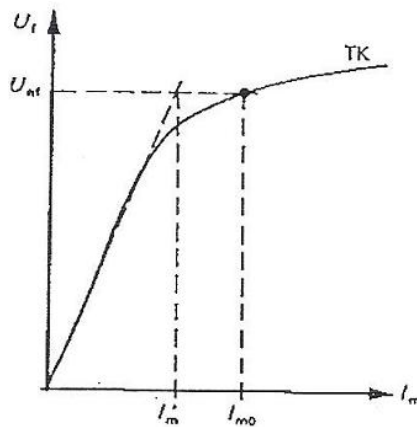


Figura 48- Característica em vazio [4].

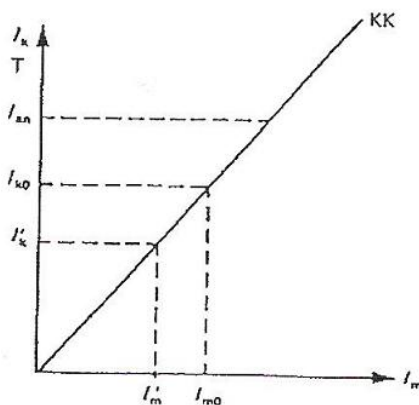


Figura 49- Característica de curto-circuito [4].

Se o enrolamento do estator for curto circuitado, a velocidade nominal, e  $I_m$  crescer gradualmente,

a corrente de curto-circuito  $I_k$  aumenta linearmente com  $I_m$ . A curva de curto-circuito CC (figura 49) é linear com aumento da corrente  $I_k$  que é várias vezes maior que a corrente nominal  $I_{an}$ . A razão disto é que o fluxo de reação da armadura  $\phi_s$ , com uma carga reativa pura ( $R_a$  é desprezável) atua contra o fluxo principal  $\phi_r$ , de acordo com o diagrama vetorial da figura 50. Deste modo o ferro não ficará saturado.

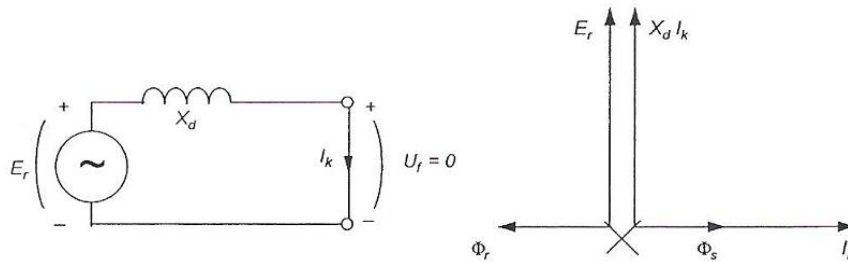


Figura 50- Enrolamento da armadura em curto-circuito c [4].

Na fig. 51 mostra a curva de regulação  $I_m = f(I_a)$  com  $U_f$  e fator de potência constantes. A fig. 52 mostra  $U_f = f(I_a)$  a velocidade, corrente de excitação e fator de potência constantes.

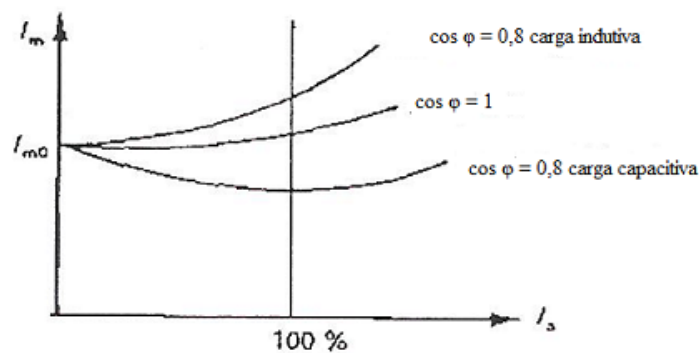


Figura 51- Característica externa [4].

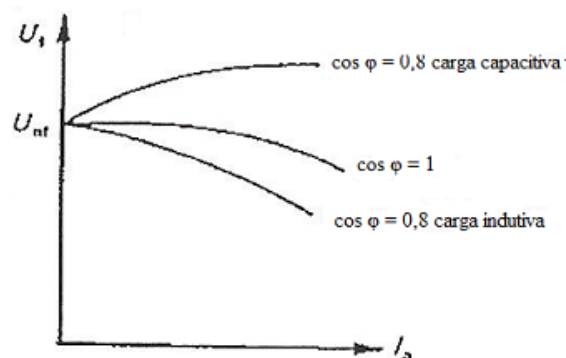


Figura 52- Característica de controle [4].

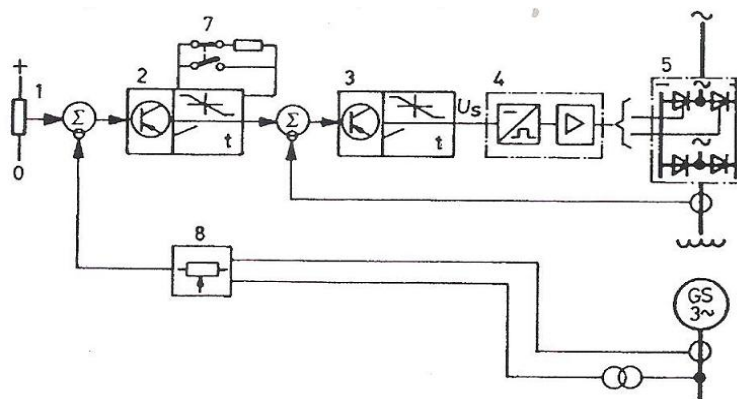
## 4.2.2- Regulação da máquina síncrona como gerador

O gerador que faz parte do simulador TERCO, têm as seguintes características: 1,2 kVA, fator de potência 0,8, Y220V 3,5A  $\Delta$ 127V 6,0A com corrente de excitação DC de 220V, 4A.

SYNCHRONOUS MACHINE 3-Phase		MV 1008 - 225
Generator	1,2 kVA x 0,8	Ser. No. 25006
Motor	1,0 kW	Temp. class. B (130°C)
Y 220V 3,5A	$\Delta$ 127V 6,0A	Protection class (IP23)
	50 Hz 1500 rpm	Duty type S2 30 min
Excitation	DC 220V 1,4 A	Norm IEC 34-1
 TERCO STOCKHOLM SWEDEN		

Figura 53- Chapa de característica da Máquina síncrona.

O gerador trabalha com ponto de neutro central que pode ser curto circuitado, isolado ou ligado por uma impedância a terra. As bobinas do campo do gerador, são alimentadas com uma tensão variável de 0 – 220VDC por um conversor SSD507 [8]. O conversor é constituído por uma ponte de dois tirístores e dois díodos de simples fase e semi controlado (só nos tirístores), alimentado a 240V, 50Hz [14].



1. Potenciômetro referencia
2. Amplificador controlo tensão
3. Amplificador controlo corrente
4. Modulador impulso disparo
5. Modulo tiristor
6. Transdutor de medida
7. Regulação tensão Manual./Automático
8. Compensador negativo.

Figura 54- Diagrama de blocos do regulador de tensão [4], [8].

A tensão do barramento do gerador, é usada para manter a tensão de referência da excitação. A tensão de referência é compensada pela corrente da carga do gerador para dar estabilidade no funcionamento mesmo que vários geradores operem em paralelo. (isto é conhecido como compensação negativa). O valor desejado por ser ajustado por dois potenciômetros (controlo de tensão total e controlo de tensão fino). Quando a tensão de regulação é comutada para “Aut” opera o circuito de controlo de tensão e controla uma tensão constante. Quando o comutador é comutado

para “Man” o sistema de controlo é desligado e o sistema é controlado pela corrente de campo. O limitador de corrente integrado no conversor, limita a corrente de campo prevendo sobrecargas e a deterioração das bobinas de excitação [8].

### 4.2.3- Ensaio da máquina síncrona

Foi feito um ensaio á máquina síncrona, ligando uma fonte de alimentação na armadura e, medindo a tensão de saída da ponte de retificação trifásica montada na carga, que serve de referência para manter uma tensão de compensação às oscilações da carga. Ver em anexo esquemas elétricos desenho 2.

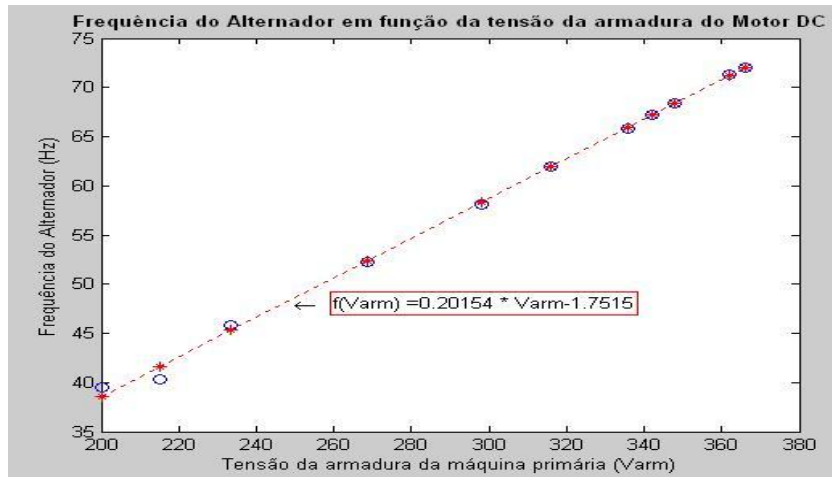


Figura 55- Frequência do Alternador em função da tensão da armadura do motor DC.

Tabela 3- Relação das Tensões da armadura - Ponte retificadora

Tensão da armadura	Tensão Ponte
20	88
40	180
60	264
80	331
100	380
120	422
140	455
160	480
180	500
200	512
220	528
240	539

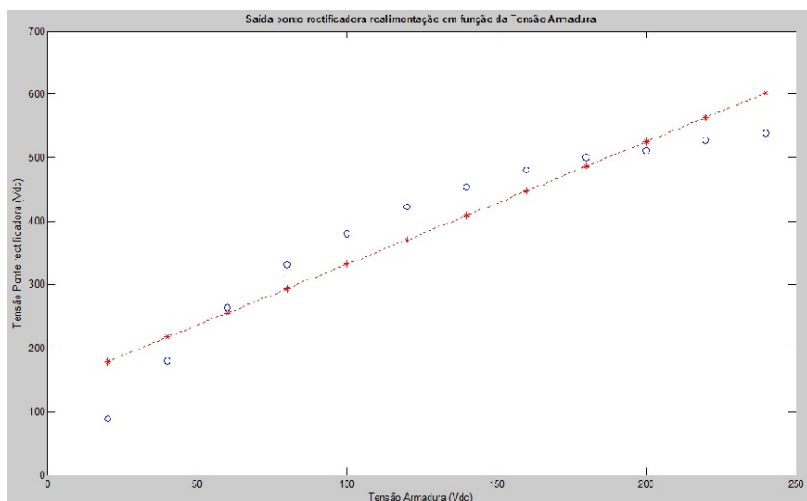


Figura 56- Tensão da armadura tensão de referência 20-240VDC

Considerou-se a gama de tensões de 20VDC até aos 240VDC e, construiu-se a respetiva curva figura 56. Constatou-se que não há uma correspondência linear, não tendo assim, quando há uma variação da corrente da carga do alternador, por consequência da tensão, uma compensação na realimentação também linear

Assim, como a tensão nominal da armadura do gerador é de 220VDC, construiu-se um novo gráfico figura 57, considerando-se a parte mais linear ou seja entre 180VDC e os 240VDC.

Para efeitos de regulação, vamos adotar o diferencial de 20VDC em relação ao nominal ou seja, o espaço entre 200VDC e os 240VDC.

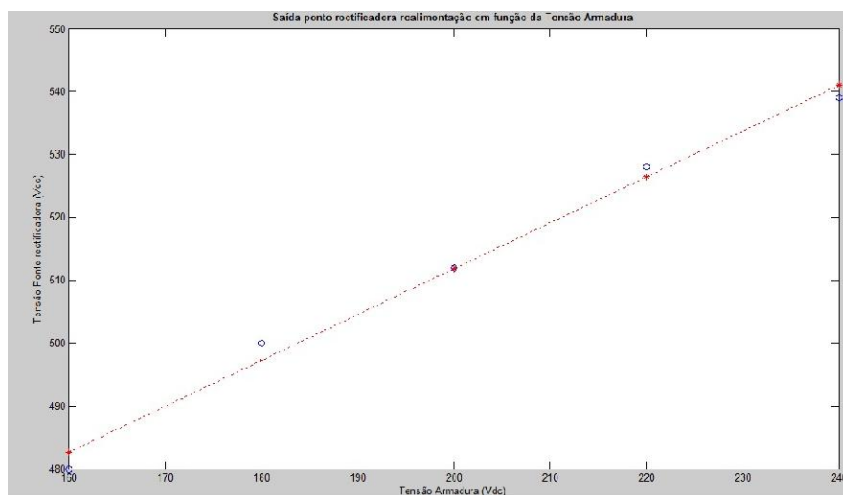


Figura 57- Tensão da armadura tensão de referência 200-240VDC.

Para o funcionamento em automático teremos que fazer a (manter o valor eficaz da tensão com variações da corrente da carga), teremos que injetar no pino 1 do variador uma tensão proporcional á saída da máquina síncrona. Como a tensão de saída é de 220V, consideramos que poderá variar 10% o que para os cálculos adotamos o valor possível máximo de 240V.

Assim, teremos a montagem retificadora não controlada, ver em anexo desenho 2, em que o valor médio da tensão é dado pela fórmula [15]:

$$V_{co} = \frac{2 \cdot q}{\pi} V_m \cdot \text{sen} \frac{\pi}{q} \quad (35)$$

onde  $V_{co}$  valor médio da tensão

$V_m$  valor máximo da tensão

$q=3$  tipologia trifásica

$$V_{co} = \frac{2 \cdot 3}{3,14} \cdot 240 \cdot \sqrt{2} \cdot \text{sen} \frac{180}{3} = 561V$$

Teremos então que diminuir a tensão pois conforme manual do variador, esta não pode exceder 120V.

Colocamos então um divisor de tensão em que se considerarmos uma resistência  $R_1 = 50k\Omega$ , e  $R_2 = 10k\Omega$ , vem:

$$V_s = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{in} \quad (36)$$

$$V_s = \frac{10}{60} \cdot 561 = 93,5 V$$

A máquina síncrona (alternador) tem a sua frequência diretamente dependente da velocidade, já o valor eficaz da tensão gerada, depende da sua excitação.

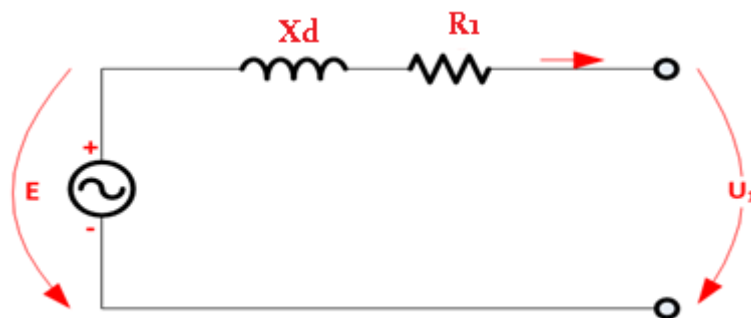


Figura 58- Esquema simplificado do gerador síncrono

$$U_1 = E - (R_1 + jX_s)I$$

$$E = - N \cdot k \cdot \Phi$$

$$\Phi \equiv (I_{exc})$$

A regulação do grupo gerador do simulador de redes, é assim realizada por dois reguladores de tensão. Um regula a velocidade e através desta, a frequência do alternador. O outro, regula a tensão

de excitação e através desta, a corrente de excitação, o qual mantém o valor desejado da tensão eficaz do gerador, compensando a sua queda interna  $(R_1 + jX_s) \cdot I$ .

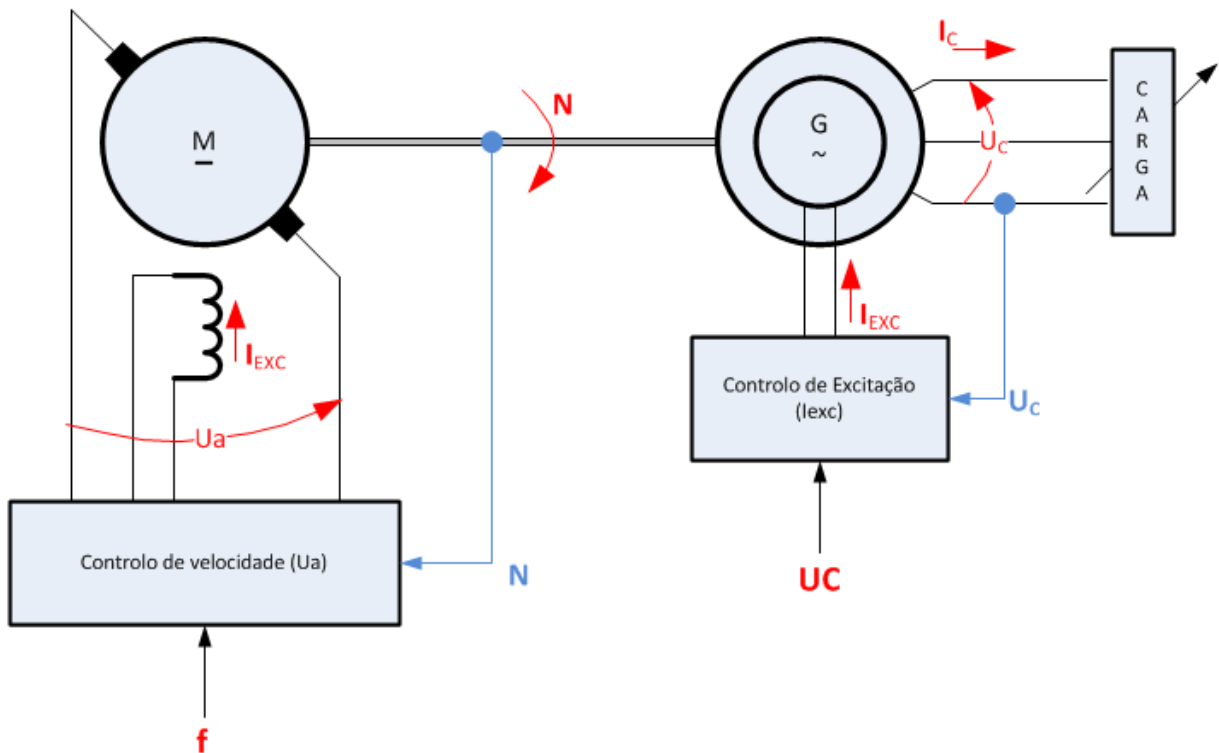


Figura 59- Esquema da regulação do grupo gerador

#### 4.2.4- Problemas encontrados nas ligações do alternador

Tal como aconteceu no motor DC e relatado anteriormente, as ligações do conversor á excitação do alternador estavam feitas de modo errado e era impossível o controlo do seu funcionamento. Assim, como se observa na figura 60, em Aut. o polo positivo da ponte retificadora ia ligar ao positivo da excitação e, nestas condições a proteção disparava. Só funcionava em Man. Mas, não se conseguia uma estabilização da tensão de saída da máquina síncrona bem como a frequência.

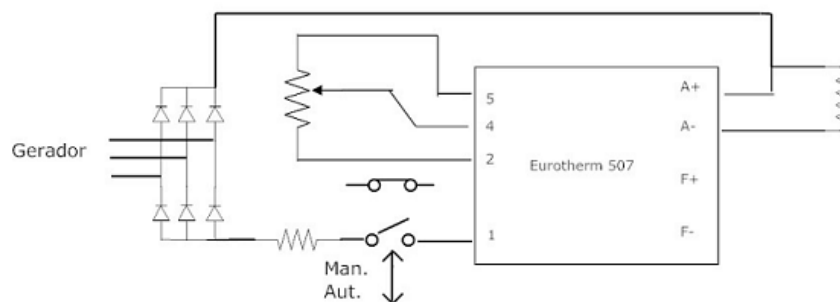


Figura 60- Ligações trocadas na máquina síncrona.

Fez-se as ligações conforme a figura 61 pois considerou-se como certas mas, ainda o

funcionamento não era o mais satisfatório.

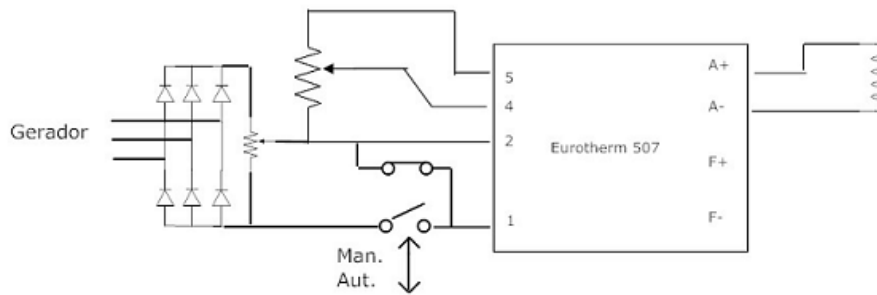


Figura 61- Ligações depois da correção na máquina síncrona.

Assim e mais uma vez em analogia com o que se passou com o motor DC, consultou-se o manual do conversor. Também os micros interruptores estavam em posição mal programada. Como se encontrou

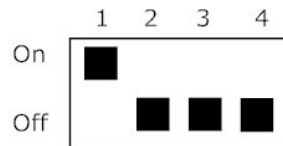


Figura 62- Regulação errada dos micros interruptores [8].

Como se programou

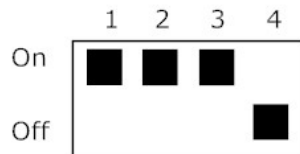


Figura 63- Regulação correta dos micros interruptores.

A programação é semelhante á do Eurotherm 508 [8]. como se indica na tabela 2, só diferindo na corrente que este conversor pode fornecer. Sendo assim não se coloca novamente a tabela, podendo ser consultado o modo de funcionamento no catálogo que se anexou a este relatório.

Depois do teste dos painéis C1 e C2, tentou-se ligar o painel 3 mas, nada funcionava. Depois de uma verificação, constatou-se que os cabos de ligação de alimentação entre o painel 2 e 3 estavam desligados. Ligou-se conforme marcação dos fios. Quando foi reposta a corrente de alimentação, a proteção diferencial disparou. Depois do levantamento do esquema, deparou-se com a troca dos condutores da parte lógica (terminais X3, 58 condutores) entre os painéis C2 e C3. Depois de algum tempo e pesquisa, ligou-se tudo em conformidade. Já estava, em termos lógicos o sistema dos painéis C1, C2 e C3 em condições de funcionamento.

## 5- Sincronismo da máquina síncrona com a rede

Se uma máquina síncrona tiver de ser ligada a uma rede trifásica sob tensão, dever-se-á verificar as seguintes condições:

Mesma frequência

Mesma tensão

Mesma sequência de fases

Coincidência de todas as fases

Regulando a corrente de excitação da máquina síncrona, coloca-se a tensão desta ao mesmo nível da tensão da rede.

Verifica-se a sequência de fases com um indicador de sequência. Normalmente, isto só deverá ser feito uma vez. Se a sequência de fases é incorreta, ou o sentido de rotação está trocado, ou há duas fases trocadas.

O gerador deverá ser ligado à rede no momento em que as fases coincidem. Um método tradicional para verificar isto é com três lâmpadas. Na figura 64, mostra o modo de ligação das lâmpadas. Se as lâmpadas são colocadas em triângulo e há uma coincidência de fases, a lâmpada 1 está apagada e, as lâmpadas 2 e 3 estão acesas com igual intensidade. Se o gerador roda ligeiramente mais rápido ou mais lento, os pontos de luz rodam numa direção ou inversa respetivamente.

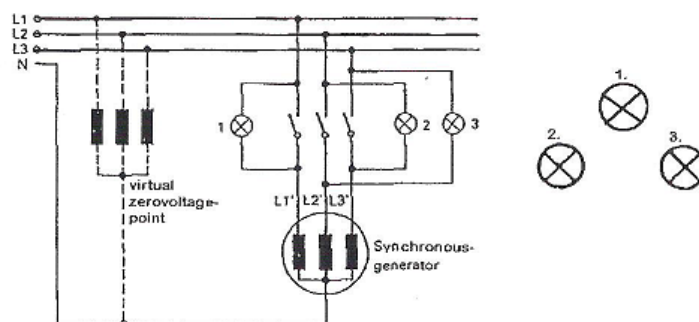


Figura 64- Exemplo de ligação de sincronismo [4].

O importante é o ponto neutro da rede estar ligado com o do gerador. Com alta tensão, as lâmpadas podem ser ligadas a transformadores calculados para essa tensão.

As lâmpadas podem ser ligadas também de forma a apagarem ou acenderem com o ponto de sincronismo.

Normalmente, é usado um sincronoscópio que é fundamentalmente um motor com um enrolamento trifásico no estator e outro no rotor criando um fluxo rotativo. O rotor é equipado com uma agulha. Quando a sequência de fases é correta, ambos os campos rodam no sentido dos ponteiros do relógio. Quando existe uma diferença de frequência entre o gerador e a rede, a agulha roda ou no sentido dos ponteiros do relógio ou no sentido inverso. Se a frequência é a mesma, a agulha pára.

Nos sistemas modernos, o sincronismo é automático. Regulam a tensão e a frequência automaticamente. No momento em que o gerador e a rede estão em sincronismo, liga o comutador e, ficam ligados em paralelo.

## 6- Linhas de Transporte

Neste simulador, existem sete modelos de linhas de transporte [4]:

Painel C4

- Modelo 1 210kV, 100mVA 100km
- Modelo 2 210kV, 100mVA 100km
- Modelo 3 69kV, 50mVA 50km
- Modelo 4 34,5kV, 20mVA 20km

Painel C5

- Modelo 5 34,5kV, 20mVA 20Km
- Modelo 6 13,2kV, 5mVA 5km
- Modelo 7 13,2kV, 5mVA 5km

### 6.1- Característica das linhas modelo

Vamos considerar como exemplo prático a linha modelo 1 partindo do princípio que se segue o mesmo raciocínio para as outras linhas.

A linha modelo 1, é uma linha de transmissão de potência com 100km para uma tensão de 210kV e uma corrente de 276A.

Então, a potencia da linha será dada por:

$$S_n = 210 \cdot 10^3 \cdot 276\sqrt{3} = 100MVA \quad (37)$$

O modelo trabalha com uma tensão de 400V e corrente 2A. Isto significa que a escala da tensão é  $400 / 210000 = 1 / 525$  e a escala da corrente é  $2 / 276 = 1 / 138$ .

A escala da impedância será a escala da tensão dividida pela escala da corrente que será  $138 / 525 = 1 / 3,8$ .

A escala da potência será a escala da tensão, multiplicada pela escala da corrente, será  $(1 / 525) \times (1 / 138) = 1 / 72450$ .

A linha modelo, contem resistências, indutores e condensadores. Na realidade, as capacidades, resistências etc., das transmissões, estão distribuídas ao longo da linha. É difícil, emular um modelo, assim. Em virtude disso, a capacidade da linha, divide-se em dois e, reparte-se por cada um dos seus extremos. Os cálculos teóricos são também difíceis com a capacidade distribuída, e o método de concentrar a capacidade nos dois extremos é usado frequentemente. O comportamento das capacidades numa linha de transmissão depende dos níveis de tensão. Desde que a potência capacitiva depende de  $U^2$  a estrutura do problema é dominado pelo fenómeno capacitivo. Podemos dizer que a resistência e impedância da linha podem ser concentradas numa resistência e indutância (por condutor) que com certeza simplifica os cálculos.

#### 6.1.1- Capacitância

Numa linha de potência existe a capacidade ( $C_m$ ) entre os condutores e também entre os condutores e a terra ( $C_j$ ). As designações ( $C_m$ ), ( $C_j$ ) podem diferir em vários manuais. Estes condutores são normalmente suspensos e a capacidade entre a fase 1 e 2 e 3 deverá ser diferente. Os condutores são pendurados segundo uma norma e trocam de posição de uma maneira cíclica. Isto é feito principalmente para diminuir a indutância mas tem como consequência também que a capacitância (como também a resistência) ser simétrica.

$C_m$  na maior parte dos casos das linhas de transmissão será de 7 – 9 nF / Km. Depende da distribuição da carga ao longo duma linha muito comprida.

Embora a distancia entre os condutores e a terra seja maior que entre os condutores, a capacidade  $C_j$  tem um valor surpreendente alto: 6 nF / Km.

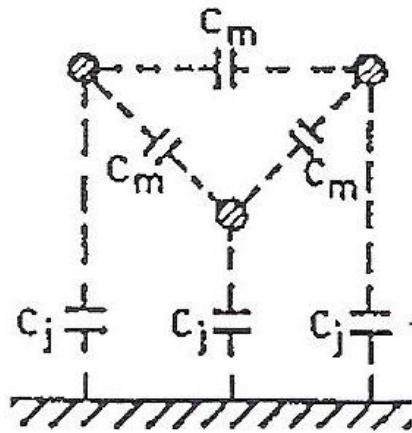


Figura 65- Capacidades entre linhas e entre linhas e terra [4].

Na figura acima, ( $C_m$ ) está representado em triângulo e ( $C_j$ ) em estrela com a terra como ponto neutro.

Ambas as quantidades podem ser transformadas como triângulo estrela ou estrela triângulo e normalmente são adicionados elementos de condensadores em paralelo que são designados por indutância mutua  $C$ .

Quando se calcula a tensão ao longo da linha, temos de usar a capacitância mutua. Quando se calcula as correntes de curto-circuito para a terra temos de considerar ambas ( $C_m$ ) e ( $C_j$ ).

### 6.1.2- Indutância

No contexto de indutância existe por vezes um erro comum de pensar que pode ser representada como uma bobine com algumas espiras. Não é bem assim. Entre outras coisas, o aperto dos condutores visa evitar isso. Nas condições de o diâmetro do condutor ser muito mais pequeno com parado com a distância que separa os condutores, a indutância depende: 1. A indutância no condutor e, 2. A indutância por fora do condutor derivada de fluxo magnético rotante a volta do condutor. Sendo assim, não se pode comparar com o fluxo magnético de uma bobine. Num condutor linear, (não uma bobine), teremos uma reactância de aproximadamente 0,40 ohm/Km a 50Hz.

Por consequência, também a resistência é dada em ohms por quilómetro (Km). Atualmente, o alumínio com alma de aço possivelmente o mais usado como linhas de transporte em vez do cobre.

### 6.1.3- Impedância

A impedância de uma linha pode ser determinada por um teste de curto-circuito onde um lado da linha modelo é curto circuitado e, no outro é aplicada uma tensão baixa ajustada até se obter a corrente nominal da linha.

Medindo a tensão  $U_k$ , a corrente  $I_k$ , e, a potência de entrada  $P_k$ ,  $Z$ ,  $X$  e  $R$  podem ser calculados:

$$Z = U_k / I_k \quad R = P_k / I_k^2 \quad X = \sqrt{Z^2 - R^2} \quad (38)$$

De notar que, o valor correto da resistência (da linha modelo), não pode ser medido diretamente com um ohmímetro porque a resistência está situada nas duas partes no elemento resistivo e no indutivo. Por este facto os cálculos tem de ser efetuados com cautela.

Como mencionado atrás, a reactância  $x$ , é aproximadamente 0,40 ohm por Km. Pode-se determinar o comprimento da linha de transmissão que o modelo representa.

A escala da impedância do modelo em causa, era 1/3,8. A seguinte equação pode ser usada para o cálculo da linha em Km:

$$X_{\text{modelo}} \cdot 3,8 = 0,40 \cdot L \quad X_{\text{modelo}} \cdot 3,8 = X_{\text{real}}$$

A secção do condutor  $S$  pode ser calculada pela seguinte fórmula – se assumirmos que a resistividade do cobre é 0,017  $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ :

$$R \cdot 3,8 = 17 \cdot L/S$$

$L$  comprimento da linha em km

$R$  valor calculado

A capacitância real é calculada por unidade de comprimento da linha real: Como a escala da corrente é 1/138.

$$U = X_c \cdot I \text{ onde } X_c = \frac{1}{\omega} \cdot C \quad (39)$$

$$I = U \cdot \omega \cdot C \quad (40)$$

$$I_c \cdot 138 = U_f \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot L \quad (41)$$

$I_c$ - corrente capacitiva da linha

$U_f$ - tensão for fase

$F$ - frequência (50Hz)

$C$ - capacitância por quilómetro (100)

$C \cdot L$ - capacitância real da linha

## 6.2- Montagens práticas para teste de linhas

Podem-se fazer várias montagens para determinar a características das várias linhas de transporte.

### 6.2.1- Teste de curto-circuito.

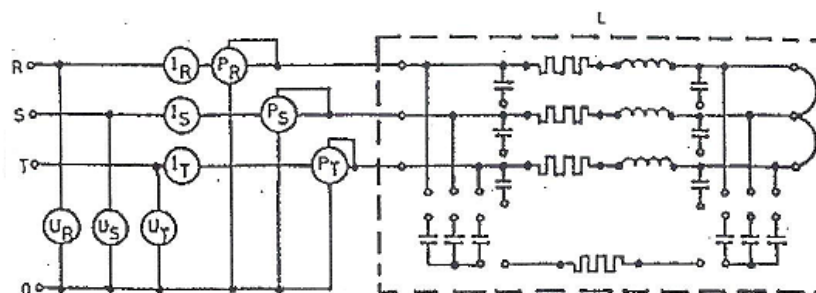


Figura 66- Teste curto-circuito [4].

Montando o circuito na linha modelo conforme a figura 66, pode-se usar um só wattímetro pois o circuito é simétrico. Ligar a fonte de alimentação, aumentando o valor da tensão lentamente de 0 até atingir o valor da corrente nominal 2 A. De seguida ler os resultados.

### 6.2.2- Teste sem carga

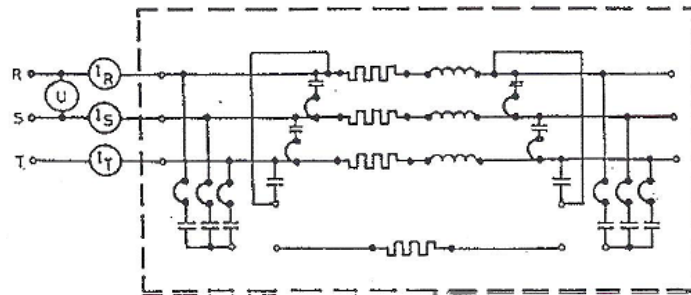


Figura 67- Teste sem carga [4].

Montando o circuito na linha modelo conforme a figura 67. Ligar a fonte de alimentação e ajustar a tensão até 400v indicado pelo multímetro.

Verificar a corrente que passa através das capacitâncias mútuas.

De seguida desligar a fonte de alimentação. Desligar os condensadores entre fases mas, deixar ligado os condensadores entre linhas e terra.

Ligar a fonte novamente a 400v. Anotar o valor da corrente da capacitância de terra  $I_{c_j}$ .

### 6.2.3- Queda de tensão na linha

A queda de tensão na linha pode-se dizer que é a diferença entre a tensão de entrada e a de saída. Pode-se usar com alguma precisão a fórmula seguinte:

$$U_{\Delta} = U_1 - U_2 = R \cdot I \cdot \cos\varphi + X \cdot I \cdot \sin\varphi - X \cdot I_c \quad (42)$$

$U_1$ - tensão de entrada

$U_2$ - tensão de saída

$R$ - resistência da linha

$I$ - corrente de saída

$\Phi$ - angulo de fase entre a corrente e a tensão a saída

$X$ - reactância da linha (calculado antes)

$$I_c = \frac{1}{2} \cdot \omega \cdot C \cdot U_2 \quad (43)$$

Onde  $C$  é a capacitância mútua da linha.

Quando se calcula  $U_{\Delta}$  medindo  $U_1$  e  $U_2$  e fazendo a diferença é fácil cometer um erro de medida grande. Isto pode ser exemplificado no seguinte exemplo.

Assumindo que  $U_1 = 130v$  e  $U_2 = 122v$  medidos com um voltímetro com uma precisão de 1,5%. O valor obtido  $130 - 122v = 8v$ . O erro absoluto é a soma dos erros absolutos em  $U_1$  e  $U_2$  ou:

$$U_{\text{erro}} = 1,5 \times 10^{-2} \cdot (130 + 122) = 2 + 1,9 = 3,9 \text{ ou quase } 4\text{v}$$

Então assumimos que o valor estimado da queda de tensão  $U_{\Delta}$  é de  $8 \pm 4\text{v}$  que é um valor com erro muito grande.

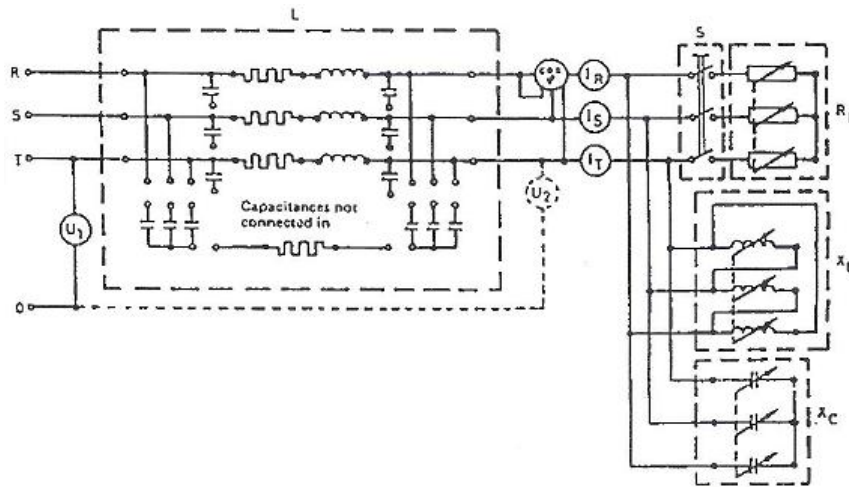


Figura 68- Teste queda de tensão [4].

#### 6.2.4- Carga resistiva

Montando o circuito na linha modelo conforme a figura 68. Ligar a fonte de alimentação e ajustar a tensão  $U_1$  até 240v indicado pelo multímetro. Ligar o interruptor S e, ajustar  $I_t$  para 1,00A. Verificar  $U_1$  se ainda mantém 240v e ajustar se necessário. Verificar se a corrente nas outras fases é de 1A e, se o fator de potência é 1. Mover o voltímetro para a saída e medir  $U_2$ . Repetir as medidas mas, colocando  $I_t$  em 2,00A. Para ter o mesmo erro sistemático de medidas, usar o mesmo voltímetro para ler  $U_1$  e,  $U_2$ .

#### 6.2.5- Carga indutiva

As mesmas medidas deverão ser feitas mas agora com um fator de potência de 0,6. Os ajustes serão simples se considerar que a corrente resistiva será de  $I \cdot \text{sen}\phi$ .

Na primeira medida de 1A, a carga resistiva deverá ser desligada e, a carga reativa deverá ser ajustada para uma corrente de  $1 \cdot 0,8 = 0,8 \text{ A}$  ou perto.

Depois, fecha-se o interruptor S, e desliga-se a carga indutiva ajustando a carga resistiva para 0,6ª para ter um fator de potência perto de 0,6 Liga-se novamente a carga indutiva (em paralelo com a resistiva). A corrente total pode diferir algo de 1ª mas é mais importante de manter o fator de potência constante: é o valor que se deverá manter constante através das medições. Regular  $U_1$  para 240v com fator de potência 0,6. Ler os valores de  $I_t$  e  $U_2$  para cada medida.

#### 6.2.6- Carga capacitiva

Nestas medidas, o fator de potência deverá ser novamente de 0,6 mas desta vez capacitivo. Consequentemente, a linha deverá ser carregada com o banco de condensadores.

Abre-se o interruptor S e, desliga-se o banco das resistências, ajustando U1 para 240v como descrito acima.

Ajusta-se a carga capacitiva para perto de 0,8A. Depois de desligar os condensadores, liga-se S1 e ajusta-se a corrente de carga resistiva  $I_a = I_c \cdot 0,6/0,80$  que finalmente dá um fator de potencia perto de 0,6 que significa a carga resistiva está em paralelo com a capacitiva. Repete-se tudo como indicado acima tomando nota novamente dos valores de It e U

## 7- Transformadores

### 7.1- Designação de ligações e marcação de terminais de transformadores

As ligações mais comuns dos transformadores trifásicos são como indicado na figura 69

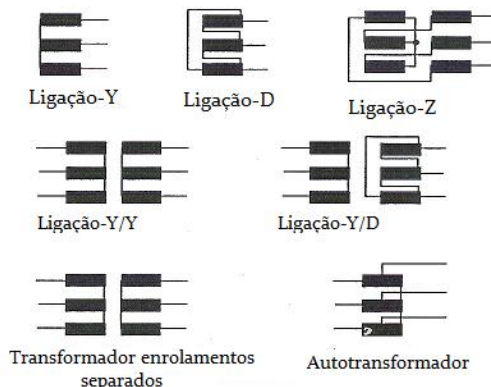


Figura 69- Tipo de ligações mais usadas em transformadores trifásicos [4].

As ligações das três fases são designadas por letras, de acordo com a tabela seguinte. As letras maiúsculas, são usadas para representar os enrolamentos de alta tensão e, as letras minúsculas para os outros enrolamentos.

Tabela 4- Designação das letras dos enrolamentos

	Enrolamentos alta tensão	Enrolamentos baixa tensão
Ligação-Y	Y	y
Ligação-D	D	d
Ligação-Z	Z	z
Ponto neutro	N	n

O deslocamento de fases entre os enrolamentos pode ser expresso pelos ponteiros do relógio. O vetor do enrolamento da alta tensão é representado pelo ponteiro dos minutos, enquanto o vetor da tensão dos outros enrolamentos é representado pelo ponteiro das horas.

A designação das ligações do transformador, simboliza qual o tipo de ligação trifásica é usada e o seu deslocamento com referência aos enrolamentos de alta tensão.

Um enrolamento de estabilização é representado pela letra +d e, um enrolamento auxiliar por +s depois dos símbolos dos outros enrolamentos.

Exemplo 1: Transformador com dois enrolamentos seguintes (Figura 70 grupo 11):

-Alta tensão primário em triângulo; -Baixa tensão secundário em estrela com neutro acessível.

A designação de ligação é então D,yn11.

Na figura 70 e 71 representa-se as designações das ligações dos transformadores trifásicos.

Grupo de ligações	Ligações IEC	Diagrama indicativo		Diagrama de ligações	
		Alta tensão	Baixa tensão	Alta tensão	Baixa tensão
0	Dd 0				
	Yy 0				
	Dz 0				
5	Dy 5				
	Yd 5				
	Yz 5				
6	Dd 6				
	Yy 6				
	Dz 6				

Figura 70- Designação de ligações de transformadores trifásicos [4].

Grupo de ligações	Ligações IEC	Diagrama indicativo		Diagrama de ligações	
		Alta tensão	Baixa tensão	Alta tensão	Baixa tensão
10	Dd 10				
	Dz 10				
11	Dy 11				
	Yd 11				
	Yz 11				

Figura 71- Designação de ligações de transformadores trifásicos continuação [4].

Exemplo 2: Transformador com três enrolamentos seguintes (Figura 71 grupo 11):

-Primário em estrela com neutro acessível; -Secundário em estrela com neutro acessível, Secundário em triângulo.

A designação de ligação é então YN,yn0,d11.

As tensões dos dois enrolamentos ligados em estrela estão em fase um com o outro (Figura 69

grupo 0). A tensão do enrolamento em triângulo está desfasada  $30^\circ$  em relação aos outros enrolamentos (Figura 71 grupo 11).

No que respeita a ligações Z-e-Y as ligações têm um ponto neutro comum. Há três maneiras diferentes de ligar o neutro a terra:

- 1- Ligação direta, o ponto neutro é ligada direto á terra.
- 2- Alta impedância de terra, o ponto neutro é ligada á terra através de uma impedância ou resistência.
- 3- Neutro isolado, o ponto neutro é isolado da terra.

## 7.2- Desenho de transformadores de potência trifásicos

Em princípio, os transformadores são compostos por duas partes principais: O núcleo e, os enrolamentos. Dependendo do desenho do núcleo e da localização dos enrolamentos, há dois tipos de transformadores.

Transformadores tipo não couraçado (núcleo com três pernas), e, transformadores tipo couraçado. Para evitar o excesso de peso, é também possível desenhar transformadores com núcleo de seis pernas em vez de três. O núcleo é feito com finas lâminas de aço (0,3-0,5mm). Hoje em dia, são usadas lâminas de aço de grão orientado.

Na figura seguinte, representa-se vários tipos de transformadores trifásicos.

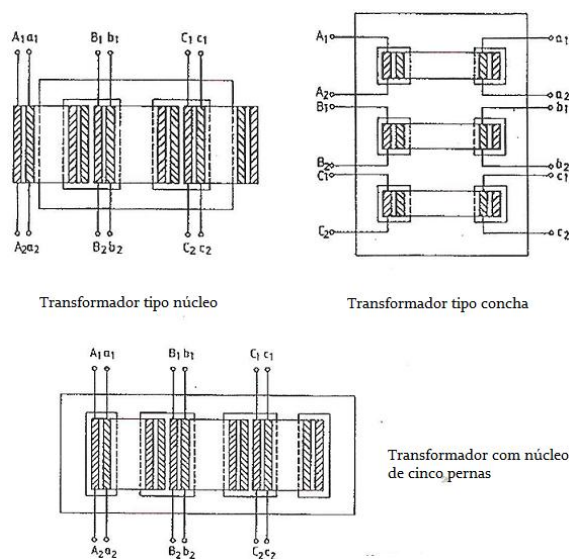


Figura 72- Vários tipos de transformadores trifásicos [4].

## 7.3- Regulação de tensão

Embora um sistema de alimentação tenha uma certa tensão, esta pode variar em alguns pontos e em diferentes horas do dia. As variações devem ser o mais pequenas possível. Por esta razão, muitos transformadores são equipados com comutadores ligados ao enrolamento para variar a relação de transformação. Muitos transformadores de distribuição estão equipados com comutadores que se podem variar quando estão em carga. Os pequenos transformadores de distribuição estão munidos de comutadores que só podem ser manobrados em vazio. A gama de ajustamento é normalmente de 3-5 posições. No total de  $\pm 5\%$ . Também neste caso, a comutação faz-se no lado da alta tensão.

No caso do simulador em estudo TERCO PST2200, temos de usar os shunts nos painéis frontais. Também nos auto transformadores ligados aos sistemas de transmissão, com diferentes níveis de tensão, são usados comutadores que são manobrados em carga. A regulação pode ser usada para controlar a potência do fluxo entre dois sistemas ou para compensar as variações de tensão num sistema.

A gama de regulação pode ser de mais de 20 posições onde cada uma causa uma variação de 1-2% em relação ao ponto de tensão médio. Isto resulta de uma gama de ajustamento cerca de 10%.

A comutação é feita do lado da alta tensão do transformador.

## **7.4- Transformadores de centrais de geração**

Nas centrais de geração, o nível de tensão é de 20-27 kV. No entanto, é usado nas linhas de transmissão muito altas tensões, na ordem de 100-800kV, ou mesmo 1000kV durante grandes distâncias. Consequentemente, são usados transformadores para aumentar a tensão. Nas grandes centrais de produção de energia elétrica, cada gerador é munido do seu próprio transformador.

O gerador é normalmente ligado á terra por uma impedância, enquanto as linhas de distribuição são ligadas diretamente, o transformador normalmente é ligado em triângulo no lado da baixa tensão e, em estrela no lado da alta tensão. A ligação mais usual é a YNd11. Exemplo do transformador usado no simulador em estudo TERCO PST2200, painel C1.

O transformador é equipado com um relé detetor de gás, relé monitor e proteção de temperatura que faz disparar o disjuntor se ocorrer uma avaria chamado Bulchoz.

Além do transformador principal, outros são usados nas plantas de geração de energia como transformadores locais, transformadores de arranque, transformadores de magnetização, etc.

Transformadores serviços auxiliares transformadores de arranque, alimentam os sistemas auxiliares da estação como bombas, compressores, ventoinhas. São necessários cerca de 10% da energia do transformador principal para alimentar os serviços auxiliares de uma estação de geração de energia elétrica.

O transformador de serviço auxiliar é normalmente ligado a uma rede externa de energia de alta tensão diferente portanto da do transformador principal. Se essa rede tiver ligação direta á terra, significa que o transformador de arranque, terá os enrolamentos em estrela em ambas as partes, lado da alta tensão e da baixa tensão. Isto significa que o transformador deverá ter um enrolamento de estabilização suplementar em triângulo. Por consequência, a designação de ligação é YN,yn0 +d. Exemplo do transformador da subestação usado no simulador em estudo TERCO PST2200, painel C6.

## 8- Relés de proteção

### 8.1- Relé estático

#### 8.1.1- Definições e normas

A comissão eletrotécnica internacional, (IEC) propõe para a seguinte definição para o relé estático. Um relé que efetua uma resposta desenvolvida pela eletrônica, por magnetismo ou outro componente sem movimento mecânico.

No entanto, um relé estático tem muitas vezes á saída um componente eletromecânico.

#### 8.1.2- Estrutura mecânica

Normalmente para se ligar um relé estático a um circuito a.c. existe um transformador para converter a tensão ou corrente para um nível, mais baixo em concordância com os circuitos eletrônicos. O transformador providencia o isolamento entre o circuito de medida e o eletrônico. Isto é essencial para prevenir os gradientes de tensão que destruiriam os semicondutores.

Em vez de transformadores, pode ser usado opto acopladores, isolando os componentes. Um opto acoplador pode fornecer vários kV de isolamento entre circuitos. Na unidade de entrada, inclui também dispositivos de proteção como varistores, condensadores, díodos reguladores, etc.

Os dispositivos eletrônicos são feitos de componentes discretos montados em placas de circuito impresso. Os circuitos são soldados a placa em forma de encaixa rápido e combinam com, por exemplo, transformadores, proteções de alta tensão ou relés de saída para formarem uma unidade maior.

#### 8.1.3- Tensão auxiliar

Diferentes dos relés eletromagnéticos, os relés estáticos requerem uma fonte de alimentação auxiliar separada. Normalmente, a tensão auxiliar para os circuitos eletrônicos anda abaixo dos 40V. No simulador TERCO PST2200 os relés tem a fonte de alimentação interna de  $\pm 24VDC$  alimentados no exterior por uma tensão mais elevada.

#### 8.1.4- Princípio de operação do relé estático

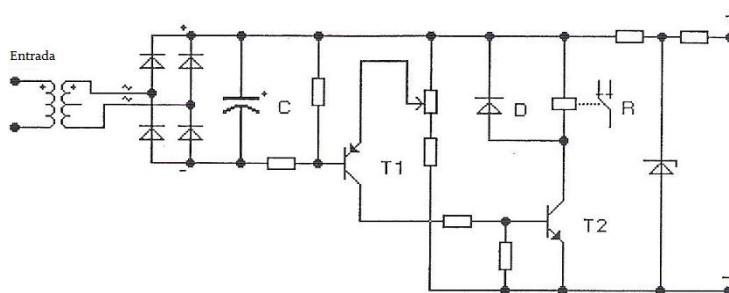


Figura 73- Circuito diagrama relé de corrente [4]

O circuito diagrama de relé de corrente é mostrado na figura 73. A corrente alternada de entrada, é convertida por um transformador de núcleo de ar em uma tensão proporcional a corrente. Este tensão alternada é retificada e filtrada, e depois comparada com a tensão de referência no transistor T1. Quando a tensão medida excede a de referência, T1 provoca a comutação do transistor T2 e por sua vez ativa o relé de saída. O circuito RC é para manter o valor constante a alta frequência, quando a tensão no secundário do transformador de entrada é alta. A desvantagem deste relé é que o tempo de reset é um pouco maior do que o tempo de descarga do condensador de filtragem. Isto

pode ser ultrapassado substituindo a ponte retificadora monofásica por uma trifásica. O condensador de filtro já não é necessário.

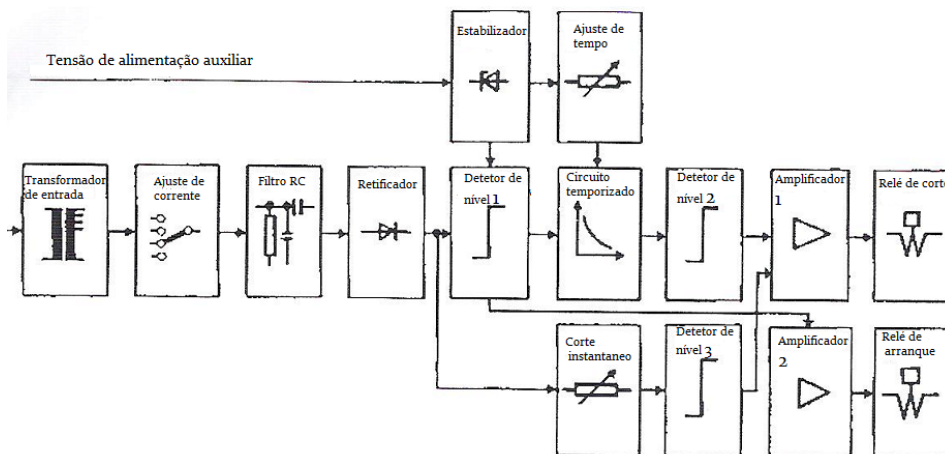


Figura 74- Esquema de blocos de relé de sobre intensidade temporizado [4].

A sensibilidade de corrente pode ser alterada em serviço, isto é, atuar antes de desligar, mudando o comutador no secundário do transformador de entrada. É usada uma resistência para converter a corrente medida em tensão em que alimenta o retificador através de um filtro RC. A tensão retificada, é filtrada e depois comparada com a tensão de referência do detetor de nível (1). Quando a tensão medida excede a tensão de referência, é alimentado um circuito temporizado, e, ao mesmo tempo o amplificador (2), atuando o relé de arranque. Este relé tem uma bandeira indicadora amarela ou vermelha.

Depois de um tempo determinado pelo ajuste e a corrente medida, o relé de corte eletromagnético é alimentado pelo detetor (2) e amplificador (1). O circuito temporizado é um circuito RC e mostrado na figura 75.

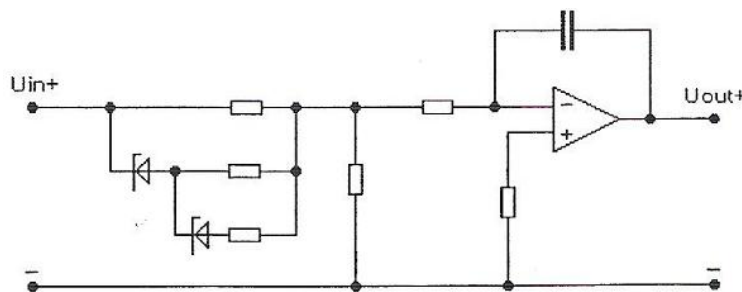


Figura 75- Circuito temporizado do relé de sobre intensidade [4].

A tensão de saída do retificador, é ligada também a um potenciômetro que alimenta o nível de tensão no detetor (3). Quando a corrente medida atinge um valor suficiente alto, o detetor de nível dá um sinal de saída ao amplificador de corte.

Este circuito por sua vez curto circuita o temporizador e, dá uma ordem instantânea de operação. A relação entre a corrente medida e o tempo pode ser expresso por:

$$t = \frac{13,5}{\frac{I}{I_0} - 1} \quad (44)$$

onde t – tempo de operação em seg;

I<sub>0</sub> – ajuste da corrente de operação;

I – Corrente de entrada;

### 8.1.5- Característica do relé direcional com tempo inverso

O diagrama deste relé está representado na figura 76. A corrente e a tensão são fornecidas pelos transformadores (1 e 3) aplicado através de resistências e condensadores ao conversor. O conversor tem duas pontes retificadoras a díodos (2) cada um ligado por resistências ao enrolamento dos transformadores de tensão (1).

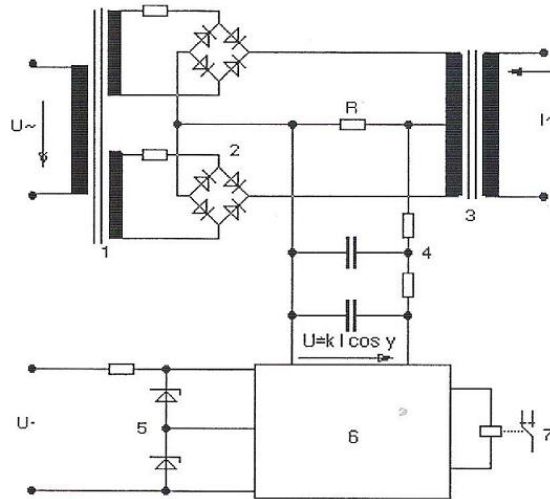


Figura 76- Relé direcional de sobre intensidade temporizado [4].

Quando os valores instantâneos da corrente e tensão de entrada são da mesma polaridade, (ambas positivas ou ambas negativas) a corrente passa através da resistência R numa direção. Quando têm polaridade oposta passa noutra. Isto é verdade quando o com ângulo zero que é o caso de haver concordância de fases. A sensibilidade é máxima. Esta condição é mostrada pelo diagrama da figura 77. A área a sombreado representa a corrente que passa através da resistência é zero.

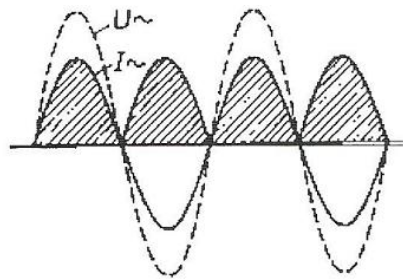


Figura 77- Curvas corrente/tempo diferença de fase  $0^\circ$  [4].

Na figura 78 mostra a curva corrente/tempo para o caso do ângulo de fase  $\phi = 45^\circ$ . Isto significa que o valor desta corrente é proporcional a  $I \cdot \cos\phi$ .

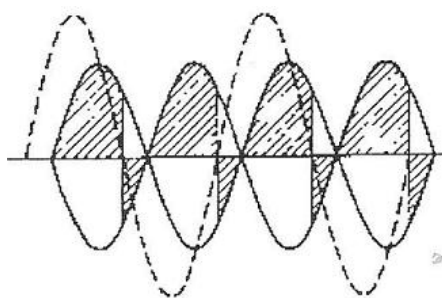


Figura 78- Curvas corrente/tempo diferença de fase 45° [4].

A corrente através da resistência R produz uma tensão filtrada em duas etapas (4) e então alimenta o detetor de nível e o amplificador de saída (6) cujo desenho é o mesmo dos outros tipos de relés mencionados atrás. A função característica de tempo inverso, é atrasada aumentando a constante de tempo do circuito de filtragem. O amplificador de saída alimenta o relé eletromagnético (7). A tensão auxiliar é estabilizada pelos díodos de regulação (5).

### 8.1.6- Aplicações dos relés

As principais aplicações deste tipo de relé são.

- 1- Proteção direcional para potencias ativa e reativa em redes simétricas com ou sem neutro
- 2- Proteção de corrente de terra e medição da resistência do defeito de terra em redes com resistência no ponto de neutro.
- 3- Perda da proteção de sincronismo para motores síncronos.

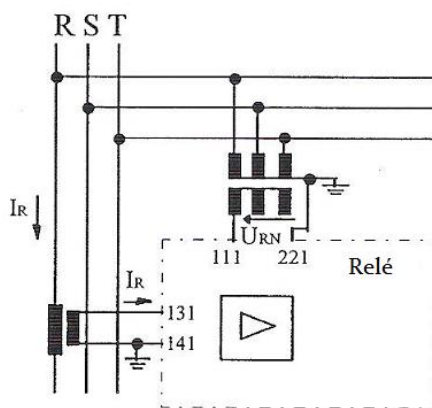


Figura 79- Proteção da potência ativa ou reativa [4].

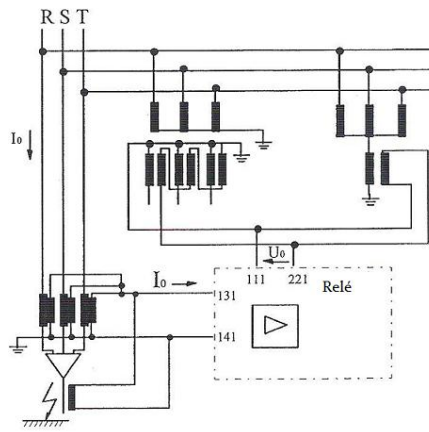


Figura 80- Proteção da corrente defeito de terra. Proteção direcional [4].

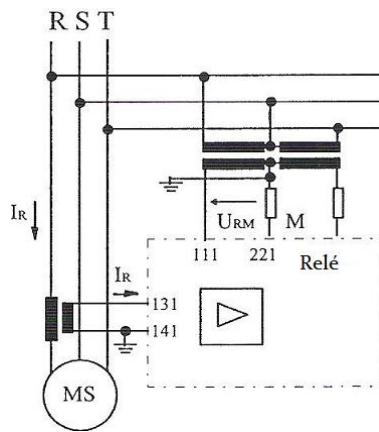


Figura 81- Proteção de perda de sincronismo [4].

## 9- Supervisão remota e aquisição de dados dos analisadores de energia

### 9.1- Analisador de energia Janitza

Como beneficiação do simulador em questão, foram montados dois analisadores de energia marca Janitza UMG96S [1] cujas ligações ficarão amovíveis de modo a monitorizar em vários pontos da instalação os vários parâmetros elétricos que estes aparelhos podem fornecer.

São aparelhos de medição adequados para medir, registar e monitorizar grandezas elétricas (true rms) em redes trifásicas ou monofásicas de média e baixa tensão com condutor neutro.

A fim de alcançar a diversidade funcional do instrumento de medição universal, eram necessários cerca de 15 unidades analógicas como um amperímetro, voltímetro, comutador de voltímetro, medidor de potência (kW, kVA, kvar,  $\cos \phi$ ), medidor eficaz de energia ativa e reativa (kWh / kvarh), um analisador de harmónicas e um conversor de medição.

Este aparelho vem fornecido com ficha de ligação para ser integrado numa rede profibus.

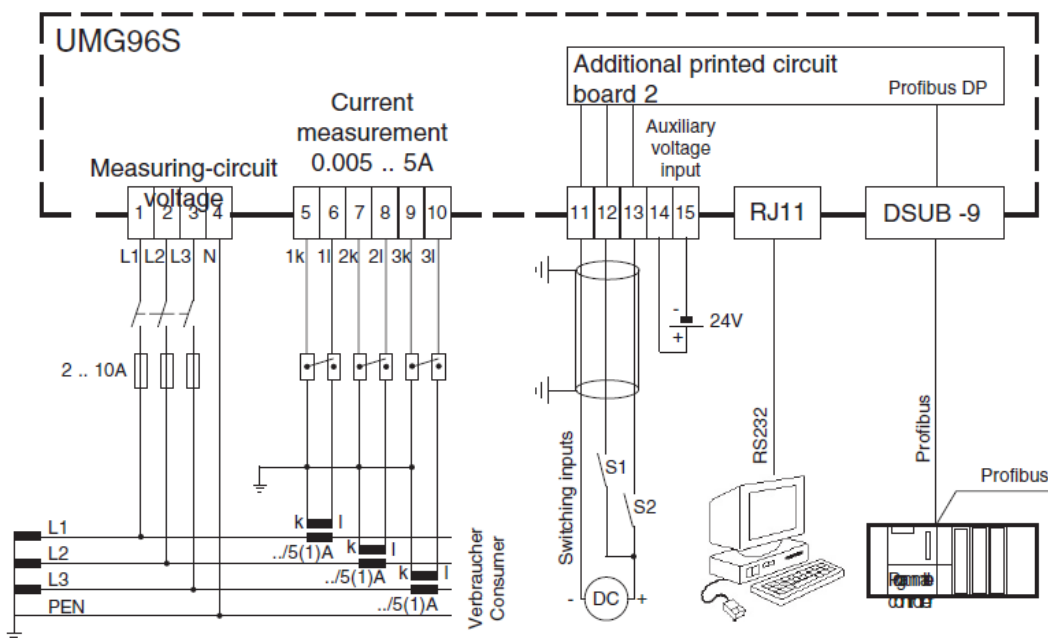


Figura 82- Janitza UMG96S [1].

Consultando o manual podemos ver o modo de operação do aparelho. Para o trabalho em questão, além das partes básicas, deu-se maior relevo aos perfis que podemos obter na rede profibus. São ao todo 14 mas, em termos de programação, deu-se maior relevo aos dois primeiros, pois contêm os valores considerados mais importantes em termos de operação.

### 9.2- Montagem da rede com protocolo Ethernet

Na figura 83, indica a montagem executada para o funcionamento do sistema

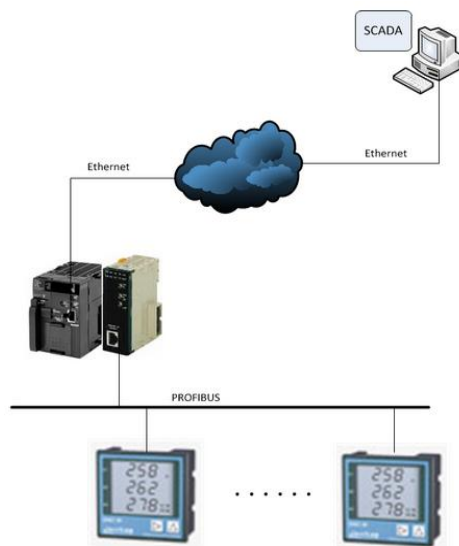


Figura 83- Rede com dois protocolos Ethernet / Profibus

### 9.2.1- Ligação á rede Ethernet

Para a ligação a rede Ethernet, significando o acesso de todo o sistema através da rede interna do ISEP, foi indicado o IP 10.0.19.109. Acontece que o IP configurado por defeito no PLC, é 192.168.1.250. Existem vários caminhos para a configuração. Pelo CX-Programmer da OMRON, usando o Browser da Internet e, por fim, usando o programa Network Configurator que por simplicidade é o que se descreve em seguida [2], [5].

Assim, liga-se o PLC ao computador através de um cabo USB. Arranca-se com o programa e, clica-se no OK.

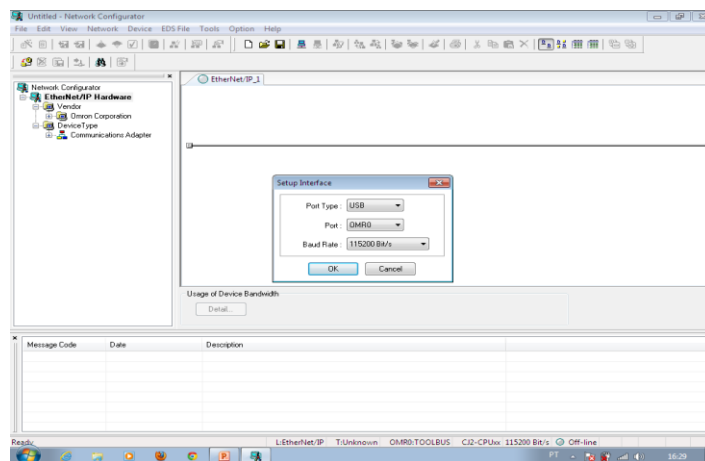


Figura 84- Configuração rede Ethernet 1

De seguida, coloca-se o IP Address que vem por defeito 192.168.1.250 em Target e, o IP desejado em “Use The Following IP Address conforme a figura seguinte.

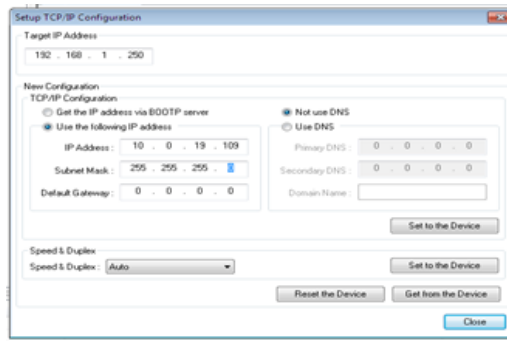


Figura 85- Configuração da rede Ethernet 2

Em seguida, Set to The Device.

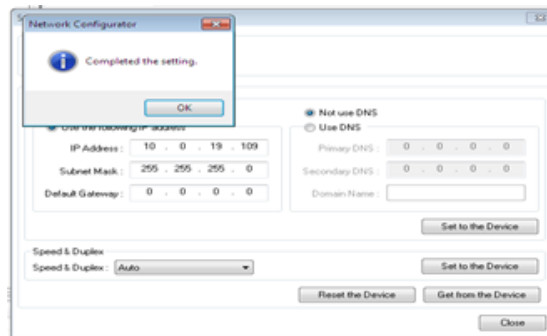


Figura 86- Configuração da rede Ethernet 3

Pode haver vários aparelhos ligados a mesma rede e, por conseguinte, as unidades são identificadas pelo endereço do nó de acesso. Existe no PLC dois micro interruptores que se devem programar entre 1 e FE hexadecimal (1 e 256 decimal). Neste caso, para o nó 109 (decimal) colocaremos 6D (hexadecimal). Será  $6 * 16^1$  no nó 1 e,  $D * 16^0$  no nó 0 [5].

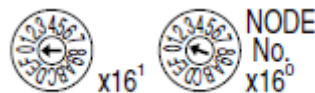


Figura 87- Micro interruptores

Neste momento, o acesso através da rede já está alterado e, podemos aceder ao PLC a partir de qualquer ponto da rede para cujo protocolo se alterou.

### 9.2.2- Configuração das cartas montadas no PLC

Este autómato foi adquirido conforme as necessidades existentes neste projeto e, há a necessidade de configurar a sua posição na memória do aparelho. Para isso é necessário ligar o CX-Programmer ao PLC que neste momento pode ser ligado de duas maneiras:

- a) Ligar o computador pessoal ao PLC através do cabo USB,
- b) Ligar o computador pessoal ao PLC através da Ethernet.

Usando o rato e, seleccionando a tabelas I/O em Project Window, e, clicando duas vezes no Menu projeto, aparece a seguinte janela:

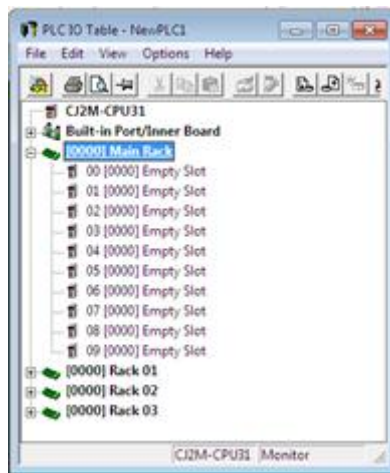


Figura 88- Configuração das cartas no PLC 1

Como se observa, não estão alocadas as cartas de entrada e saída nem a do Profibus na memória. Para a sua configuração, teremos de alterar o modo de operação do PLC para “Operation Mode Program”.

De seguida, selecciona-se novamente as tabelas I/O e clica-se “I/O tableOption create”. Por fim observa-se, como refere na figura seguinte:

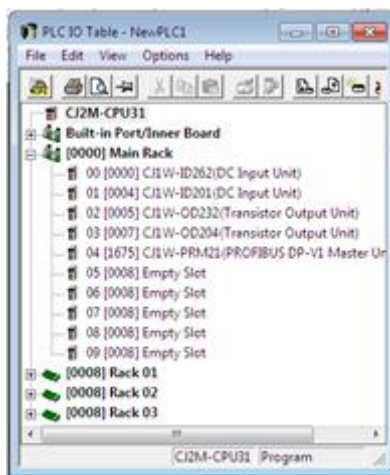


Figura 89- Configuração das cartas no PLC 2

Como se pode observar, neste momento já está mapeado na memória todas as cartas que compõem o sistema.

No address 00 temos CJ1W-ID262 (DC Input Unit). É uma carta com 64 entradas.

No address 01 temos CJ1W-ID201 (DC Input Unit). É uma carta com 8 entradas.

No address 02 temos CJ1W-ID232 (Transistor output Unit). É uma carta com 32 saídas.

No address 03 temos CJ1W-ID204 (DC Input Unit). É uma carta com 8 saídas. No address

No address 04 temos CJ1W-PRM21 (Profibus DP-V1 Master Unit). É uma carta para a rede Profibus.

A partir deste momento, estão reunidas as condições para programar todas as unidades que compõem o PLC conforme o projeto desejado.

## 9.3- Rede Profibus

### 9.3.1- Introdução

É um sistema de comunicação para troca de informação que pode economizar 40% do custo da cablagem manutenção etc., comparado com as tecnologias tradicionais. Somente se usam duas linhas para transmitir a informação relevante: dados de entrada saída, parâmetros, diagnósticos, programas e modos de operação para diferentes aparelhos.

Profibus é atualmente o líder dos sistemas baseados em redes na Europa. As áreas de aplicação incluem fabricação, automatização e geração de processos. É uma rede normalizada internacionalmente e foi normalizado com a norma EN50170. Os componentes de diferentes fabricantes podem comunicar sem necessidade de ajustes especiais de interfaces [2].

Há três versões compatíveis.

Profibus PA:

Desenhado para automatização de processos

Permite a ligação de sensores e atuadores numa linha de rede comum incluído em áreas especialmente protegidas.

Permite a comunicação de dados de energia na mesma rede (norma IEC 1158-2).

Profibus DP:

Otimizado para alta velocidade

Ligações simples e baratas

Desenhado especialmente para a comunicação entre sistemas de controlo de automatismos e de I/O distribuídas

Profibus FMS:

Solução geral para tarefas de comunicação a nível de células.

Grande gama de aplicação e flexibilidade

Possibilidade para uso em comunicações complexas e extensas.

### 9.3.2- Configuração

Para colocar em funcionamento a rede Profibus, é necessário a utilização de uma ferramenta de software de configuração CX-Profibus. A configuração requer ficheiros especiais próprios de cada um dos dispositivos que participam na troca de informação. São fornecidos pelos fabricantes. Existem dois tipos.

Baseados em tecnologia FDT/DTM (Field Device Tools) / (Device Type Managers)

Baseados em ficheiros GSD [1].

Utilizamos no nosso projeto ficheiros GSD que são ficheiros de texto que contem as características e as opções de configuração do dispositivo que representam. Estes ficheiros, são importados pelo Configurador e posteriormente agregados ao dispositivo Mestre. São fornecidos pelo fabricante ou pode-se obter na Internet na página: <http://www.profibus.com>.

O primeiro passo é realizar as configurações de hardware na unidade Mestre CJ1W-PRM21. Colocamos o micro interruptor na posição da carta no cpu 07. Como na rede o address por defeito desta carta é o 1, teremos que nos analisadores de energia Janitza, colocar os address 2 e 3 para cada um respetivamente.

Para a ligação dos diferentes aparelhos a rede, construiu-se um cabo normalizado Profibus com fichas DB9 e ligação conforme figuras seguintes, segundo a norma EN50170 [2].

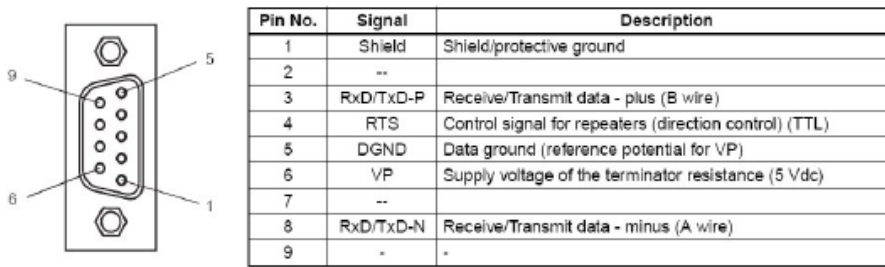


Figura 90- Ficha DB9 Profibus

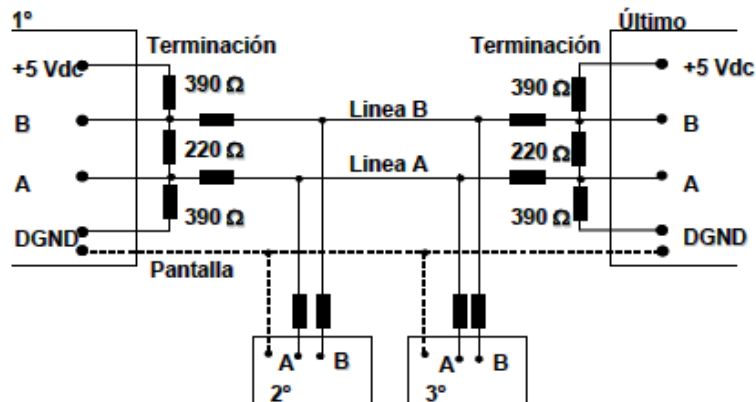


Figura 91- Esquema de ligação do cabo de rede [2].

Uma vez estabelecida a ligação física da rede, procede-se a configuração da mesma com o CX-Profibus instalado num PC. Inicia-se o software e associa-se o ficheiro GSD dos analisadores de energia conforme referido anteriormente.

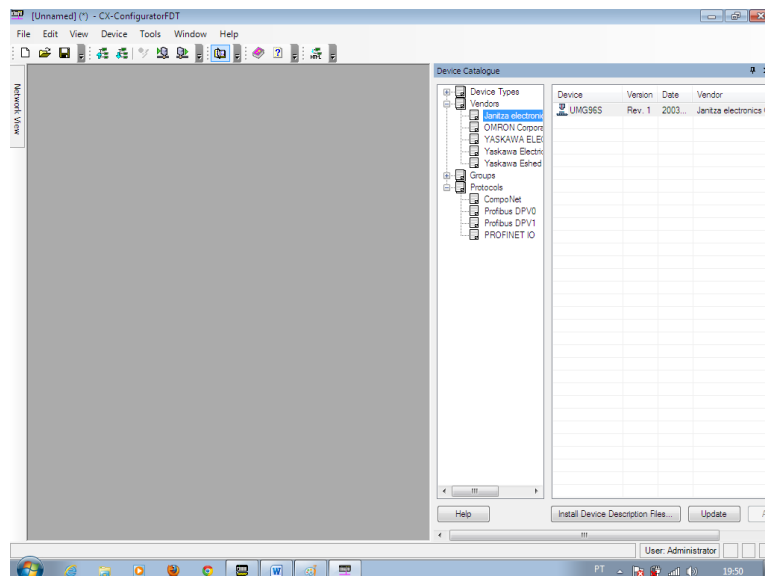


Figura 92- Dispositivos da rede

Nesta janela, aparece uma lista completa de todos os componentes instalados no configurador. De seguida, adiciona-se cada um dos componentes da rede na janela de configuração.

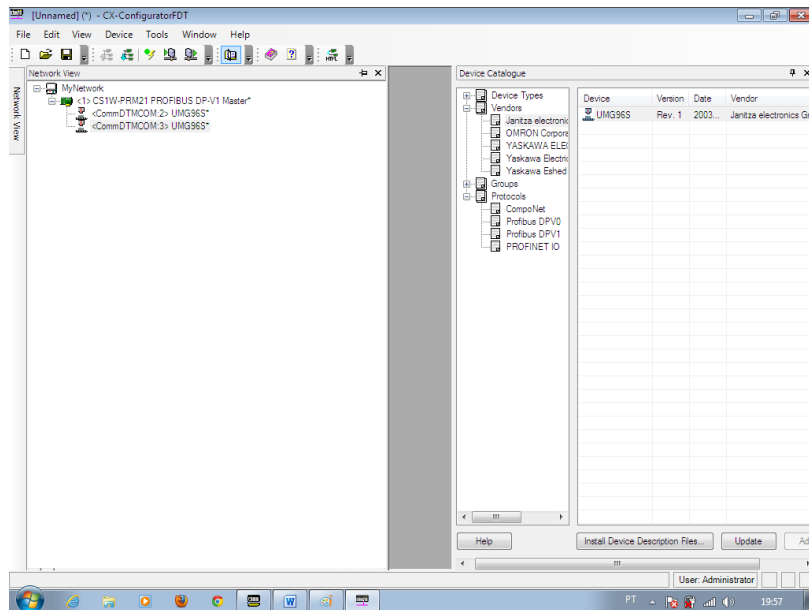


Figura 93- Configuração da rede

Vamos agora configurar os aparelhos escravos. Consultando o manual, escolhendo os profiles 1 e 2, necessitamos de 62 Bytes.

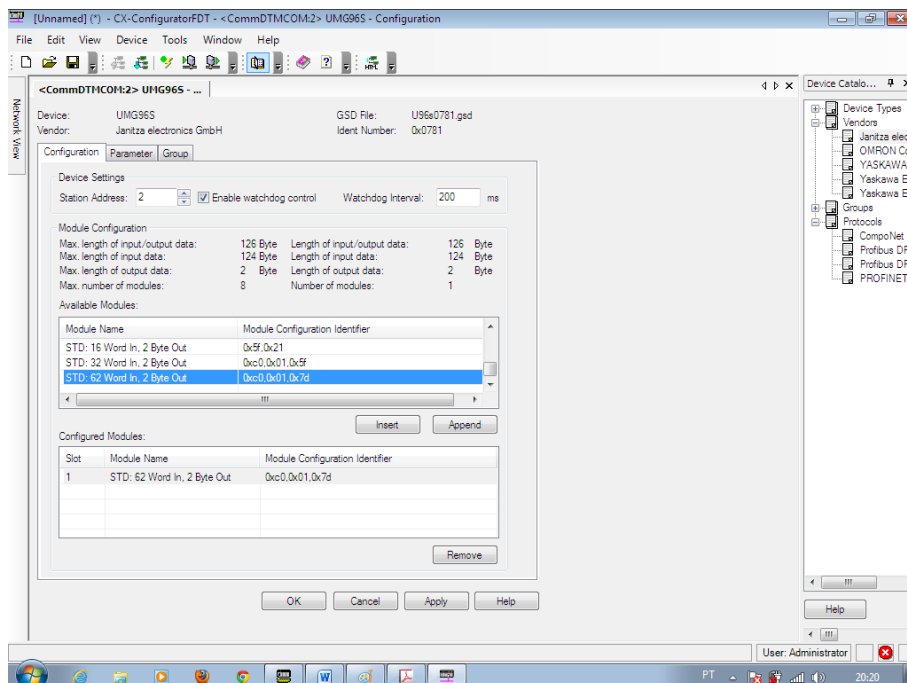


Figura 94- Configuração dos aparelhos escravos

Depois desta configuração, seguimos a configurar a unidade Mestre. Para aceder a configuração, opera-se idêntico aos escravos: fazer duplo click sobre a unidade Mestre conforme figura seguinte

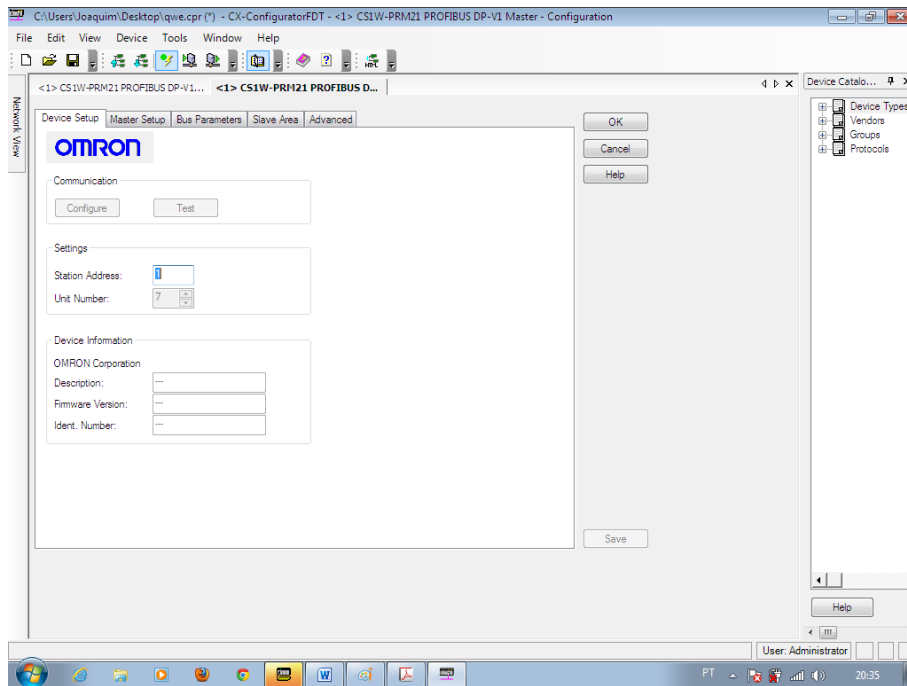


Figura 95- Configuração da unidade Mestre

Liga-se a rede introduzindo o IP que configuramos na respetiva secção

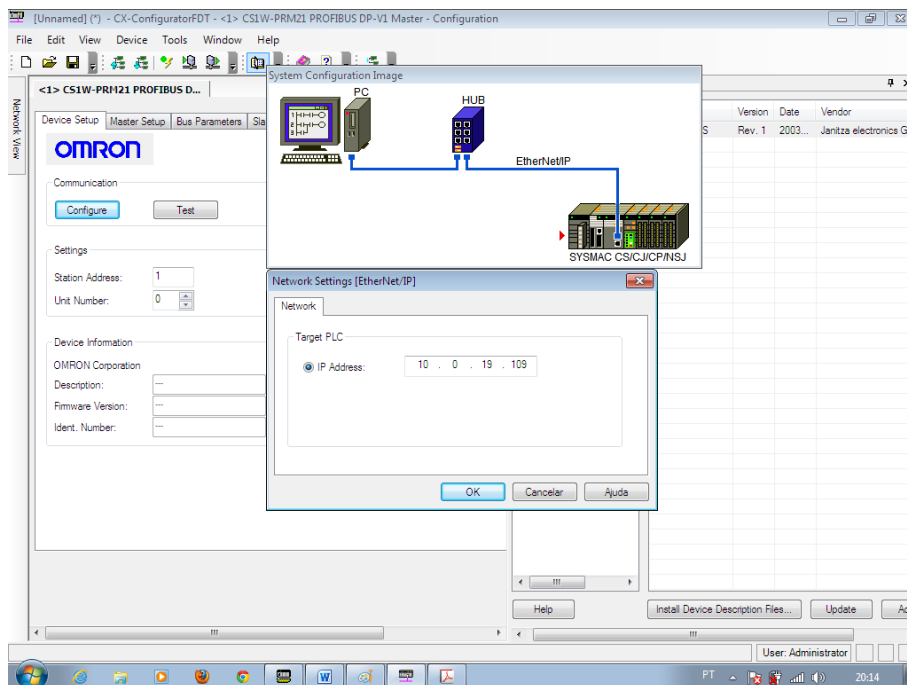


Figura 96- Ligação a rede

Depois de ligação faz-se o diagnostico da rede e,

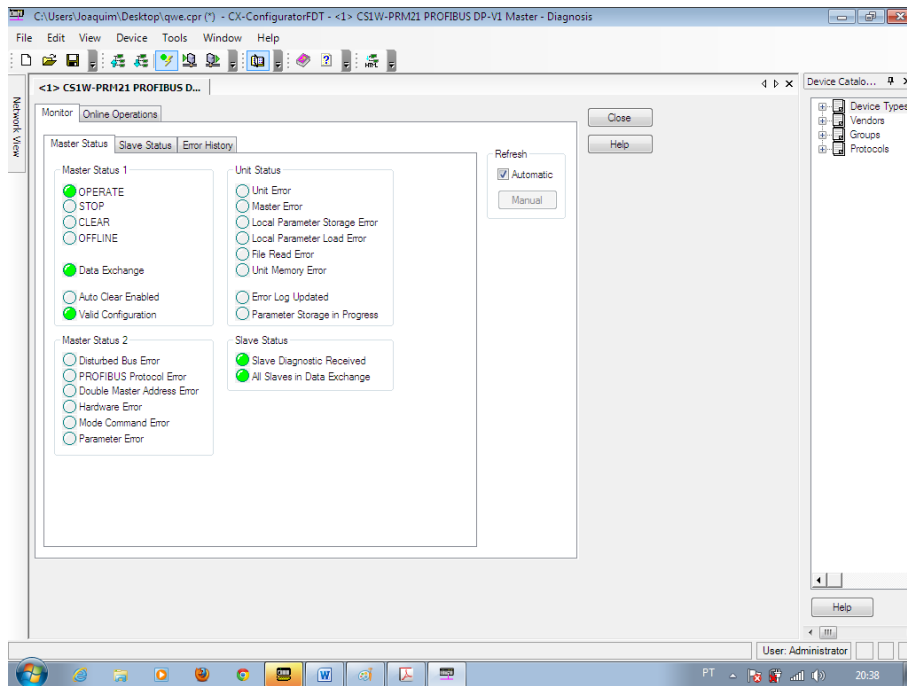


Figura 97- Diagnostico do Master

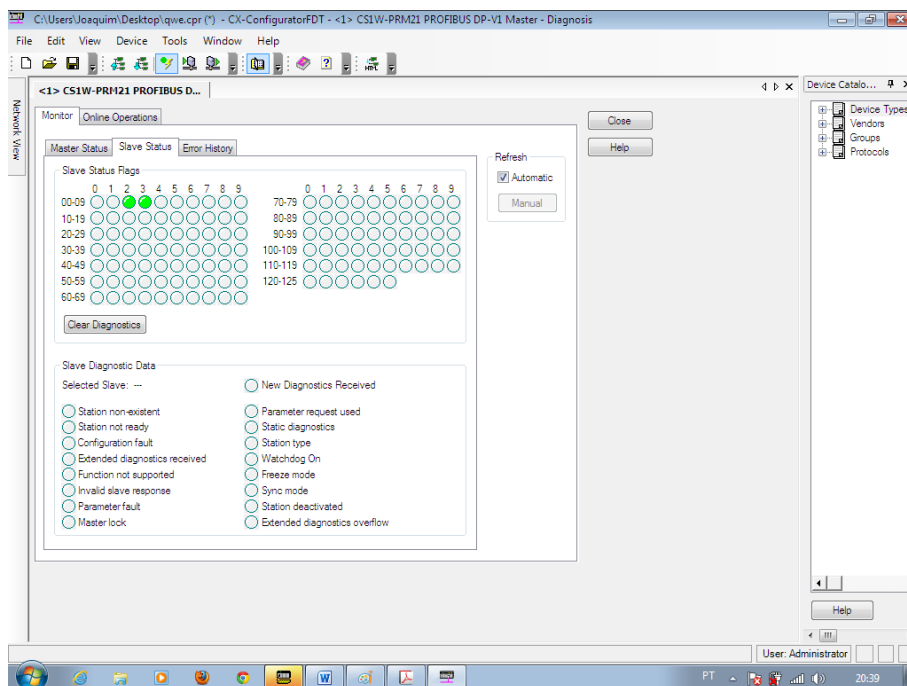


Figura 98- Diagnóstico dos Escravos

A rede Profibus neste momento está operacional. Verifica-se que os leds indicadores de operação estão todos a verde tanto na CPU do PLC como na carta PRM21 do Profibus. De seguida, é necessário verificar, configurar os “profiles” escolhidos nos analisadores de energia para ter acesso á informação dos parâmetros que se escolheu. Temos de ir a memória do PLC para programar e identificar as grandezas elétricas.

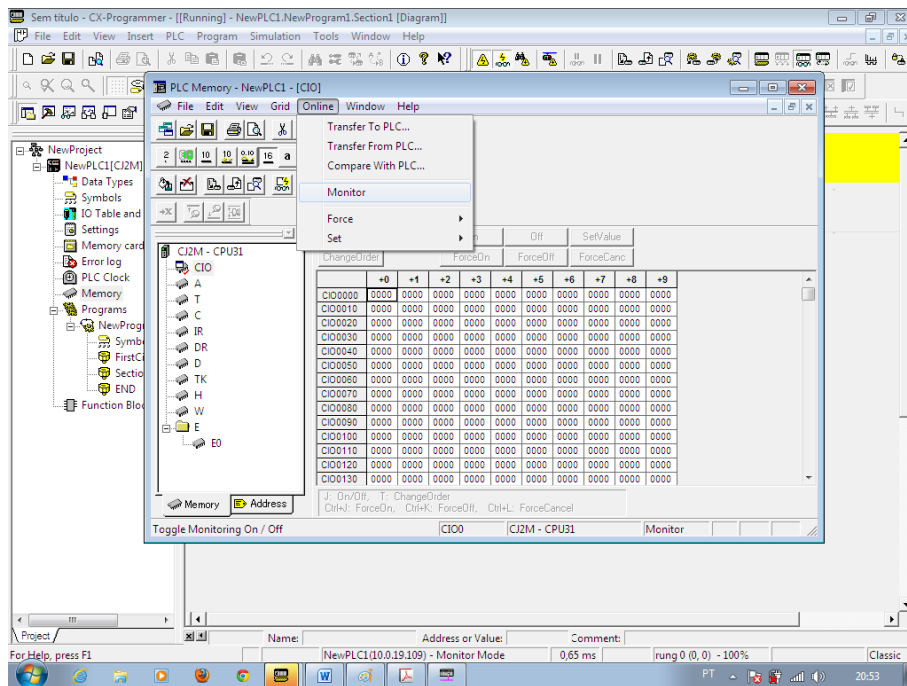


Figura 99- Mapeamento dos endereços de memória CIO

No address CIO3200 coloca-se o “profile” desejado do Janitza address 2 e no address CIO3201 coloca-se o “profile” do Janitza adress 3. Nas entradas CIO3300 até CIO3361 estarão as grandezas elétricas do Janitza address 2 e, em CIO3362 até CIO3399 as grandezas do Janitza address 3. Na tabela seguinte estão indicados os valores das grandezas elétricas nos respetivos endereços de memória para o “profile” 1 nos dois aparelhos. Para os restantes “profiles” é só alterar nos endereços CIO3200 e CIO3201.

Tabela 5- Mapeamento de memória CIO

	+0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CIO3200	Profile Janitza Adress2	Profile Janitza Adress3								
CIO3300		Q1	Q2	Q3	S1	S2	S3	Freq.	UlnL1	UlnL2
CIO3310	UlnL3	UL1-L2	UL2-L3	UL1-L3	IL1	IL2	IL3	P1	P2	P3
CIO3320	cosφ L1	cosφ L2	cosφ L3	tnd_u_L1	tnd_u_L2	tnd_u_L3	tnd_i_L1	tnd_i_L2	tnd_i_L3	
CIO3330										
CIO3340										
CIO3350										.
CIO3360				Q1	Q2	Q3	S1	S2	S3	Freq.
CIO3370	UlnL1	UlnL2	UlnL3	UL1-L2	UL2-L3	UL1-L3	IL1	IL2	IL3	P1
CIO3380	P2	P3	cosφ L1	cosφ L2	cosφ L3	tnd_u_L1	tnd_u_L2	tnd_u_L3	tnd_i_L1	tnd_i_L2
CIO33900	tnd_i_L3									

### 9.3.3- Aquisição e supervisão das grandezas elétricas em ambiente Windows.

A passagem das grandezas elétricas dos “profiles” dos analisadores de energia contidas na memória CIO do PLC para o ambiente Windows foi feita no programa Microsoft visual studio em visual basic [10].

O código fonte está em anexo, e podemos aceder aos valores desejados através de um executável, não havendo necessidade do programa base estar instalado no PC.

Na figura seguinte, mostra valores adquiridos em sistema monofásico, inserido nas três fases e com os transformadores de intensidade em série. Sistemas de cargas diferentes foram ligados nos dois aparelhos.

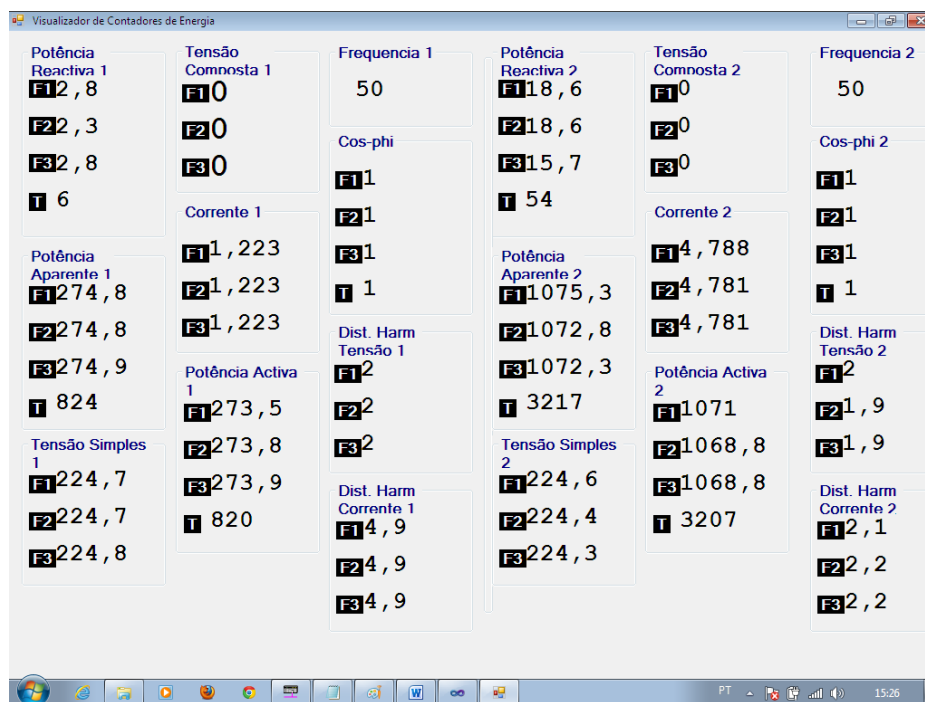


Figura 100- Grandezas elétricas em ambiente Windows (visual studio)

Foi comparado estes valores com os tirados em sistema MODBUS através da porta RS232 dos analisadores de energia Janitza e, os valores são idênticos.

## 10- Conclusões e trabalhos futuros

O simulador que consta deste trabalho está em funcionamento e, foram colocados na prática os conhecimentos teóricos apreendidos ao longo dos anos letivos. Para trabalhos futuros, fazer o levantamento da lógica das duas placas que compõem o simulador e depois de as analisar, projetar o software na linguagem LADDER. Programar e fazer as ligações de hardware do autômato OMRON C2JM. Com o protocolo ethernet IP 10.0.19.109 de acesso ao mapeamento da memória do plc, desenvolvido neste trabalho, em visual basic projetar o SCADA. Também, substituir as cartas eletrônicas de visualização das grandezas elétricas por aparelhos do mesmo tipo Janitza pois assim há a possibilidade de visualizar através da rede profibus o simulador de energia todo em simultâneo. Poder-se-á também desenvolver num outro tipo de linguagem como o Supervisor da Omron. Estará assim completa a supervisão, controlo, e a aquisição de dados (SCADA) de todo o processo que compõe esta instalação.

Como complemento e, em virtude dos relés de proteção estarem já desatualizados, seria uma mais-valia, a substituição, á imagem dos analisadores de energia Janitza, por um sistema mais atual.

## 11- Bibliografia

- [1] Manual Janitza UMG96S\_Manual\_English\_-\_version\_with\_external\_power\_supply.pdf
- [2] Manual profibus W05E-EN-01+CX-PROFIBUS+OperManual.pdf
- [3] Manual TERCO PST 2200 Power System Simulator Laboratory
- [4] Terco Power System Simulator
- [5] CS- CJ-Series EtherNet/IP Units Operation Manual W465-E1-06.pdf
- [6] Manual carta profibus W509-E2-01+CJ1W-PRM21+OperManual.pdf
- [7] Manual PLC CJ2M W473E109sm
- [8] Parker SSD-Drives-506-507-508-Manual 12A 1Q - 115V or 230V 1ph AC to DC Motor Speed Controller
- [9] Parker 512C Analog DC Drive HA389196
- [10] Visual\_Studio\_2010\_All-in-One\_For\_Dummies.pdf
- [11] WS02-CFSC1-E-NetworkConfigurator\_Z905-E1-08
- [12] Siemens- Motores de corrente continua Edição 01.2006
- [13] O Alternador Síncrono Trifásico Manuel Vaz Guedes 1996
- [14] Electric Power Transformer Engineering- James H. Harlow 2004
- [15] Electrónica de Potencia ISEP – Engº Luis Paupério
- [16] Maria Helena Osório Pestana de Vasconcelos, "Avaliação e controlo de segurança de redes interligadas com grande penetração eólica com base em métodos de aprendizagem automática", Tese de doutoramento Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2007.

## 12- Anexos

Em CD

Esquemas elétricos do simulador (50 desenhos)

Manual de operação do analisador de energia Janitza UMG96S

Manual profibus W05E-EN-01+CX-PROFIBUS+OperManual.pdf

CS- CJ-Series EtherNet/IP Units Operation Manual W465-E1-06.pdf

Manual carta profibus W509-E2-01+CJ1W-PRM21+OperManual.pdf

Manual PLC CJ2M W473E109sm

Parker 512C Analog DC Drive HA389196

Parker SSD-Drives-506-507-508-Manual 12A 1Q - 115V or 230V 1ph AC to DC Motor Speed Controller

WS02-CFSC1-E-NetworkConfigurator\_Z905-E1-08

Código fonte em visual studio das grandezas elétricas em ambiente Windows.

Ficheiros do MODBUS dos dois aparelhos Janitza (txt).

Ficheiro GDS para profibus Janitza

Displays carta de medidas (VK1760H-VK1763H.pdf)