

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA

declaro que as
solicitações feitas
por minha pessoa,
quanto as alterações
desta dissertação foram
atendidas.
24/12/84
prof. Dr. João Carlos de Oliveira

ESTUDO DA PARTIDA DE MOTORES DE INDUÇÃO

TRIFÁSICO ATRAVÉS DE CAPACITORES

1985 .

Campinas, SP, Brasil

ESTUDO DA PARTIDA DE MOTORES DE INDUÇÃO
TRIFÁSICO ATRAVÉS DE CAPACITORES

por

Décio Bispo

Dissertação apresentada à
Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual de Campinas
para obtenção do título de Mestre

Orientadores: Prof. Dr. José Carlos de Oliveira
Prof. Dr. Jaime Szajner

1985

Campinas, SP, Brasil

Dedicatória

Ao meu pai,
pelo incentivo e pelo seu esforço.

AGRADECIMENTO

Ao Prof. José Carlos de Oliveira um agradecimento especial pelo apoio, confiança e amizade, bem como pelo esforço na orientação.

Ao Prof. Jaime Szajner, pela orientação e apoio.

Aos amigos Paulo Henrique Rodrigues dos Santos, Kátia Mara Daud e Wanderley A. da Silva, pela ajuda no laboratório, pela datilografia e desenhos, respectivamente.

Aos professores da Faculdade de Engenharia de Campinas pelos ensinamentos durante os cursos realizados.

À Universidade Federal de Uberlândia, pela disponibilidade e uso do computador e laboratórios.

Sinceros agradecimentos a todas as pessoas que colaboraram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O trabalho aqui desenvolvido se propôs a estudar a partida do motor de indução trifásico com a utilização de bancos de capacitores, comparando este processo de partida com processos convencionais.

Inicialmente, é apresentado um estudo didático com objetivo de sintetizar a teoria básica da partida de motores, e sua consequente extensão aos efeitos sobre os sistemas elétricos.

A escolha do sistema de controle de reativos na partida de motores desenvolveu-se através de uma montagem experimental com os resultados obtidos verificados nos oscilogramas apresentados no trabalho.

Para o estudo final, executou-se uma simulação digital das partidas convencionais e da partida com utilização de bancos de capacitores, utilizando um programa de estabilidade transitória.

Através de uma análise comparativa com os outros métodos de partidas convencionais do motor de indução trifásico e a tendência de uma melhor elaboração do sistema de controle de reativos, pode-se concluir como viável este processo para uso em sistemas industriais, merecendo ainda estudos adicionais.

ABSTRACT

The work developed in this research aimed at the study of the start-up of induction motors using capacitor and the comparison between this method and those so called conventional methods.

In the first part of the work a general didactic theory about motor starting is shown and the consequent effects upon the system are considered.

Following this, a control method is established so that the required reactive power is controlled to attend motor needs.

A digital computer study is then carried out and conventional and capacitor methods of starting are compared, using a given transient stability programme.

The final results obtained are then discussed in the conclusions, from which it can be seen the method is feasible even though it deserves further studies.

Í N D I C E

	Página
CAPÍTULO I - Introdução	
1. Introdução	01
2. Aspectos gerais do trabalho	03
CAPÍTULO II - Análise dos Métodos de Partidas de Motores de Indução	
2.1 - Introdução	05
2.2 - Equações para partida do motor de indução	10
2.3 - Partida a tensão plena	12
2.4 - Partida com tensão reduzida - métodos convencionais	14
2.4.1 - Chave compensadora	14
2.4.2 - Partida com inserção de resistência no estator	17
2.4.3 - Partida com inserção de reator no estator	19
2.4.4 - Partida através da chave estrela-triângulo	21
2.5 - Partida com inserção de resistência rotórica (rotor em anéis)	22
2.6 - Motor de indução com dupla gaiola	24
2.7 - Comparação dos diversos métodos	26
2.7.1 - Método direto	26
2.7.2 - Auto-transformador	27
2.7.3 - Resistência ou reatância no circuito do estator	27
2.7.4 - Chave estrela-triângulo	28
2.8 - Considerações Gerais	28

CAPÍTULO III - Partida do Motor de Indução com a utilização de Capacitores

3.1 - Introdução	29
3.2 - Cálculo do capacitor de partida	33
3.2.1 - Determinação da flutuação de tensão sem capacitor	35
3.2.2 - Determinação da flutuação de tensão com capacitor	38
3.2.3 - Determinação do(s) capacitor(es) para o acionamento	44
3.3 - Considerações Gerais	46

CAPÍTULO IV - Chaveamento do Banco de Capacitores

4.1 - Introdução	47
4.2 - Chaveamento do banco de capacitores através de disjuntores	47
4.2.1 - Introdução	47
4.2.2 - Chaveamento de capacitor em pa- ralelo	50
4.2.3 - Desligamento de bancos de capa- citores	53
4.3 - Capacitor chaveado a tiristor	54
4.4 - Reator chaveado a tiristor	55
4.5 - Especificação do reator e capacitor do RCT (reator controlado a tiristores) ..	58
4.5.1 - Especificação do capacitor	58
4.6 - Considerações Gerais	60

CAPÍTULO V - Dimensionamento Básico dos Parâmetros da Fonte Controlável de Reativos

5.1 - Introdução	62
------------------------	----

5.2 - Determinação do capacitor	62
5.3 - Determinação do reator	62
5.3.1 - Indutância	63
5.3.2 - Número de espiras	63
5.3.3 - Constante K_n	63
5.3.4 - Valor de r	63
5.4 - Circuito de controle dos tiristores ..	63
5.5 - Resultados experimentais	67
5.6 - Considerações Gerais	72

CAPÍTULO VI - Modelagem Computacional da Partida de Motores de Indução através do suprimento variável de reativo

6.1 - Introdução	74
6.2 - Estrutura básica do programa utilizado e recursos de estudo disponíveis	74
6.3 - Modelo do motor de indução de gaiola simples	75
6.3.1 - Circuito equivalente em estado permanente	75
6.3.2 - Inclusão do transitório mecânico	76
6.3.3 - Inclusão dos transitórios elétricos e mecânicos do rotor ..	76
6.3.4 - Inclusão no modelo do transitório mecânico do motor e dos transitórios do estator e rotor	77
6.4 - Representação para o motor de gaiola dupla	78
6.4.1 - Circuito equivalente em estado permanente	78

6.4.2 - Inclusão do transitório mecânico	79
6.4.3 - Inclusão do transitório mecânico e elétrico do rotor	80
6.4.4 - Fator de gaiola	82
6.5 - Implementação digital dos dispositivos	83
6.6 - Simulação Digital	87
6.6.1 - Caso 1 - Partida direta do motor de indução	88
6.6.2 - Caso 2 - Partida com auto-transformador	95
6.6.3 - Caso 3 - Partida estrela triângulo	102
6.6.4 - Caso 4 - Partida com resistência série	109
6.6.5 - Caso 5 - Partida com reatância série	116
6.6.6 - Caso 6 - Partida com um único capacitor	123
6.6.7 - Caso 7 - Partida com vários capacitores	130
6.7 - Considerações Gerais	137
CAPÍTULO VII - Conclusões Gerais	138
APÊNDICE	141
1.1 - Introdução	141
1.2 - Ensaio do rotor livre ou ensaio a vazio do MIT	141
1.3 - Ensaio com rotor travado ou em curto-circuito de um MIT	144
BIBLIOGRAFIA	148

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1. Introdução:

Os problemas associados a partidas de motores são bastante conhecidos e métodos para as suas soluções são usados com sucesso, desde o início da utilização destas máquinas girantes. Fundamentalmente, a principal causa de todos os inconvenientes criados, está relacionada ao alto nível de potência reativa exigida nos instantes iniciais que se seguem após a energização do motor. Para o suprimento deste alto valor de potência reativa, torna-se essencial o surgimento de uma alta corrente de partida que, diretamente causa efeitos do tipo queda de tensão nos sistemas alimentados e seus efeitos correlatos. Quanto ao desenvolvimento de formas de controle desta potência através de alterações do projeto do motor propriamente dito, este procedimento é pouco efetivo a não ser que haja um comprometimento das características operacionais do motor. Desta forma, a solução mais adequada é a de reduzir o impacto da partida por controle da fonte de tensão que estará aplicada aos terminais do motor nos instantes de partida. De fato, embora se esteja estabelecendo a priori que a partida constitui problema para o sistema elétrico, deve-se antes de qualquer providência corretiva, analisar o efeito para cada sistema em particular. Isto deve ser realizado pois, em função do nível de curto circuito do barramento de conexão da máquina, tais medidas podem ser perfeitamente dispensáveis. Todavia, para aqueles em que se detetar a possibilidade da criação de distúrbios de partida, caso soluções para a partida não sejam implantadas, problemas do tipo oscilações de tensões e subsequentes efeitos sobre equipamentos e iluminação po-

dem ocorrer em valores inaceitáveis pelos padrões de qualidade de fornecimento de energia elétrica normalmente exigidos.

Em caso de se confirmar a existência de quedas de tensões acima do máximo permitido, a solução que também prejudica o próprio desempenho de partida do motor, é a de reduzir momentaneamente a tensão aplicada diretamente aos terminais do motor. Para tanto, utiliza-se de técnicas amplamente empregadas nestes casos, como seria o caso da inserção, entre o barramento de alimentação e o motor, de um auto-transformador, reator, etc. Naturalmente, o clássico emprego de resistências rotóricas adicionais poderia também ser lembrado para o caso de motores de indução com anéis. Infelizmente, com exceção deste último caso, os demais métodos são prejudiciais à operação do motor, pois resultam em uma redução do torque inicial de modo que, em situações extremas o tempo de partida poderá se estender em demasia ou até mesmo não se conseguir o sucesso desta operação. Um outro aspecto não menos significativo é o inter-relacionamento entre o tempo de partida e a vida útil do motor. Realmente, para um motor, um tempo de partida maior significa que este ficará sujeito a correntes elevadas por um período de tempo maior, sofrendo pois um sobreaquecimento superior ao de um mesmo motor operando sob condições de partida mais rápidas.

Procurando conciliar aspectos relacionados ao atendimento dos reativos sem prejudicar a operação do motor, a partida através de capacitores representa uma outra proposta para a solução do problema, e que até a presente data não foi explorada com grande intensidade devido a alguns aspectos a serem elucidados no decorrer do texto. A principal vantagem da partida por capacitores é que com este processo não há uma redução do torque de partida do motor além de que, para o sistema elétrico de alimentação não se registram aumentos significativos de potência reativa e de corrente em relação àqueles valores de operação normal. Porém, para que esta solução possa ser efetivamente utilizada torna-se necessário um

controle de potência reativa do banco de capacitores, controle este que idealmente deverá acompanhar o processo de aceleração, culminando por deixar apenas uma parcela do banco para compensar o fator de potência em regime permanente.

A análise desta proposta de solução, a sua simulação digital, o projeto e construção de um modelo e finalmente os testes de laboratório são as metas que nortearam as idéias deste trabalho de mestrado.

Para atingir estes propósitos, o trabalho foi dividido em duas partes fundamentais. Numa primeira são discutidos os aspectos teóricos da questão que culmina com o desenvolvimento de uma metodologia de simulação digital do fenômeno da partida de motores por capacitores. Numa segunda, apresentam-se os resultados experimentais pertinentes a esta filosofia de partida.

Dentro destes objetivos, o trabalho final ficou caracterizado por uma estrutura que é comentada a seguir.

2. Aspectos Gerais do Trabalho

* No capítulo II, estuda-se fisicamente o problema da partida de motores, pelos processos convencionais. Com a utilização do circuito equivalente por fase do motor, montam-se as equações fundamentais para a análise da corrente de partida, torque de partida, escorregamento correspondente ao torque máximo e o torque máximo, fazendo-se com este tipo de equacionamento a análise individual de cada tipo de partida.

* No capítulo III, estuda-se a utilização de capacitores para partida de motores, bem como a especificação do capacitor de partida com base numa máxima variação de tensão definida no instante da partida.

* No capítulo IV, estuda-se o problema do chaveamento ' direto do banco de capacitores, através do chaveamento controlado a tiristor. Faz-se também o estudo da utilização do capacitor fixo com reator variável, sendo este controlado a tiristores.

* No capítulo V, têm-se os resultados experimentais obtidos em laboratórios, levantamentos de parâmetros de motores, descrição dos circuitos de controle e verificações gerais.

* No capítulo VI, têm-se a análise da representação do motor de indução para o estudo de estabilidade transitória, com a obtenção das equações gerais do programa e implementação digital.

* No capítulo VII, tem-se as conclusões gerais do trabalho.

CAPÍTULO II

ANÁLISE DOS MÉTODOS DE PARTIDAS DE MOTORES DE INDUÇÃO

2.1 - Introdução

O exame das interações entre o fluxo e força magnetomotriz em um motor de indução polifásico mostra que eletricamente, a máquina pode ser tratada como um transformador generalizado. A onda de fluxo de entreferro, girando sincronamente na máquina de indução corresponde ao fluxo mútuo no núcleo do transformador. O campo girante do rotor induz uma força eletromotriz (fem) de frequência de linha no enrolamento do estator da mesma maneira que a força magnetomotriz (fmm) da corrente secundária em um transformador reage sobre o primário.

Através de um tratamento [1], [2] matemático, chega-se ao circuito equivalente do motor de indução, que proporciona, inclusive as partidas dos motores para análise pelos métodos convencionais e por computadores.

Na figura 2.1 tem-se o circuito equivalente completo por fase para um motor polifásico. Este circuito é clássico e dispensa qualquer comentário adicional.

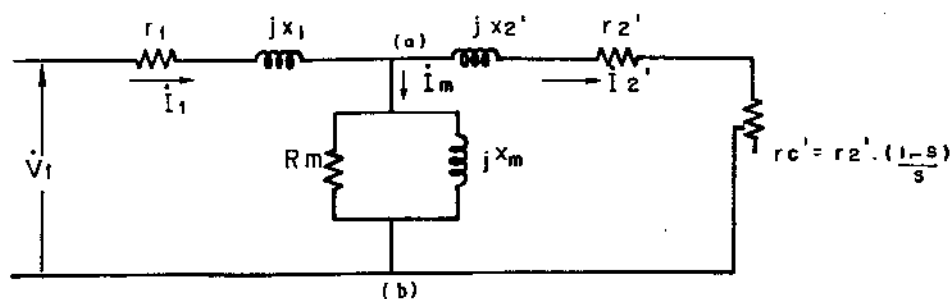


Figura 2.1 Circuito equivalente completo do MIT

onde:

$\dot{V}_1$	= tensão terminal do estator
r_1	= resistência efetiva do estator
x_1	= reatância de dispersão do estator
X_m	= reatância de magnetização
R_m	= resistência correspondente às perdas no ferro
r'_2	= resistência efetiva do rotor referida ao estator
x'_2	= reatância efetiva do rotor, referida ao estator
s	= escorregamento
$r'_2 \left(\frac{1-s}{s} \right)$	= termo associado à potência desenvolvida pelo rotor
$\dot{I}_1$	= corrente do estator
$\dot{I}'_2$	= componente de carga da corrente do estator
$\dot{I}_m$	= corrente de magnetização

Utilizando a figura 2.1, calcula-se I_1 , mostrada na equação (2.1):

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_1}{r_1 + jx_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_m} + \frac{1}{jX_m} + \frac{1}{(r'_c + r'_2) + jx'_2}}} \quad (2.1)$$

Para expressar o conjugado ou outra variável como função da tensão aplicada e do escorregamento determina-se a corrente I'_2 , com a aplicação do equivalente de Thévenin a partir dos pontos (a, b) da figura 2.1 resultando a figura 2.2.

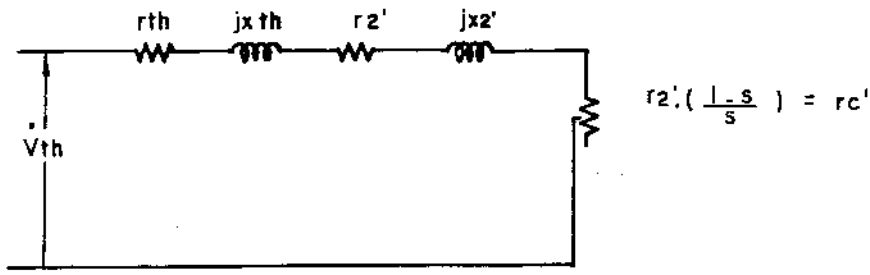


Figura 2.2. Circuito equivalente de Thévenin

onde:

$$\dot{V}_{th} = \dot{V}_1 \frac{\frac{1}{\frac{1}{R_m} + \frac{1}{jX_m}}}{\frac{1}{\frac{1}{R_m} + \frac{1}{jX_m}} + r_1 + jx_1} \quad (2.2)$$

$$\dot{Z}_{th} = r_{th} + jx_{th} = \frac{1}{\frac{1}{R_m} + \frac{1}{jX_m} + \frac{1}{r_1 + jx_1}} \quad (2.3)$$

A potência por fase desenvolvida pelo rotor, é a mesma dissipada em r_c' visto que esta representa a carga acionada, mais as perdas mecânicas. Assim tem-se:

$$P_2 = r_c' (\dot{I}_2')^2 \quad (2.4)$$

Do circuito da figura 2.2 tem-se:

$$\dot{I}_2' = \frac{\dot{V}_{th}}{\sqrt{(r_{th} + r_2' + r_c')^2 + (x_{th} + x_2')^2}} = \frac{\dot{V}_{th}}{\sqrt{(r_{th} + r_2'/s)^2 + (x_{th} + x_2')^2}} \quad (2.5)$$

$$r_c' = r_2' \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (2.6)$$

Substituindo (2.5) e (2.4) em (2.6) obtêm-se:

$$P_2 = \frac{\hat{V}_{th}^2 r_2' (1-s)}{s[(r_{th} + r_2'/s)^2 + (x_{th}' + x_2')^2]} \quad (2.7)$$

De (2.7) a potência desenvolvida pelo rotor varia com o quadrado da tensão (V_{th}). Como a diferença entre V_1 e V_{th} está na queda de tensão na impedância do estator, que é pequena, pode-se com alguma aproximação dizer que a potência desenvolvida pelo rotor é função do quadrado da tensão de alimentação.

O conjugado desenvolvido no rotor está relacionado com P_2 pela expressão:

$$P_2 = \omega_r T_2 \quad (2.8)$$

onde:

$$\omega_r = \frac{2\pi n_r}{60} \quad - \text{velocidade angular do rotor}$$

$$T_2 \quad - \text{conjugado interno desenvolvido no rotor}$$

$$n_r = n_1 (1-s) \quad - \text{velocidade do rotor}$$

$$n_1 \quad - \text{velocidade do campo girante}$$

portanto:

$$n_r = \frac{2\pi n_1}{60} (1-s)$$

Neste ponto é conveniente ressaltar a conveniência em se trabalhar com a representação dos componentes do sistema por unidade, pois grandezas do tipo velocidade síncrona, corrente nominal, etc. se tornam números unitários. Desta forma:

$$\omega_r = (1 - s) \quad (2.9)$$

portanto tem-se que:

$$P_2 = (1 - s)T_2 \quad (2.10)$$

substituindo (2.7) em (2.10) tem-se:

$$\frac{\dot{V}_{th}^2 r_2' (1-s)}{s[(r_{th} + r_2'/s)^2 + (x_{th} + x_2')^2]} = (1 - s)T_2$$

$$T_2 = \frac{\dot{V}_{th}^2 r_2'}{s[(r_{th} + r_2'/s)^2 + (x_{th} + x_2')^2]} = \frac{\dot{V}_{th}^2 r_2' s}{[(r_{th} s + r_2')^2 + (x_{th} + x_2')^2]} \quad (2.11)$$

Para obtenção de T_2 em função de I_2' tem-se que P_2 é a potência consumida em r_2' , e portanto dada por:

$$P_2 = \dot{I}_2'^2 r_2' \left(\frac{1-s}{s}\right) \quad (2.12)$$

igualando (2.12) a (2.10) obtém-se:

$$T_2 = r_2'/s \dot{I}_2'^2 \quad (2.13)$$

Com as equações (2.10) ou (2.13), pode-se traçar a característica $T_2 = f(s)$ ilustrada na figura 2.3, na qual indicam-se alguns pontos característicos.

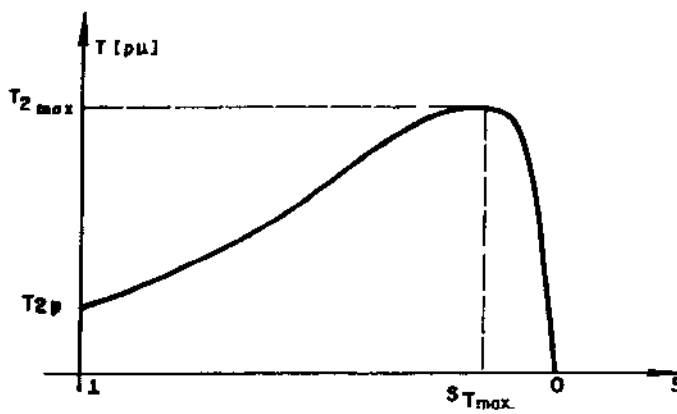


Figura 2.3. Curva $T_2 \times s$

O conjugado máximo é obtido através da determinação do escorregamento correspondente ao torque máximo (s_{Tmax}), com o uso da equação (2.11), derivando e igualando a zero.

$$[(r_{th} s + r_2')^2 + (x_{th} + x_2')^2 s^2] - s[2(r_{th} s + r_2')r_{th} + 2s(x_{th} + x_2')^2] = 0$$

ou

$$s^2[(x_{th} + x_2')^2 + r_{th}^2] = r_2'^2$$

portanto

$$s_{Tmax} = \frac{r_2'}{\sqrt{(r_{th})^2 + (x_{th} + x_2')^2}} \quad (2.14)$$

Levando o valor obtido de (2.14) em (2.11) obtém-se T_{2max} .

É conveniente ressaltar que as expressões de torque desenvolvidas são correspondentes a uma única fase do estator, devendo portanto ser multiplicadas pelo número de fases do mesmo.

2.2 - Equações para a partida do motor de indução

Considerando o circuito equivalente da figura 2.1 e 2.2 pode-se escrever:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_1}{r_1 + jx_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_m} + \frac{1}{jX_m} + \frac{1}{(r_2'/s + jx_2')}}} \quad (2.15)$$

$$\dot{I}_2' = \frac{\dot{V}_{th}}{\sqrt{(r_{th} + r_2'/s)^2 + (x_{th} + x_2')^2}} \quad (2.16)$$

$$\cos \phi = \frac{(r_{th} + r_2'/s)}{\sqrt{(r_{th} + r_2'/s)^2 + (x_{th} + x_2')^2}} \quad (2.17)$$

Para impor condições de partida, basta, nas equações (2.15), (2.16) e (2.17), fazer $s = 1$ e obter com isto, três equações que traduzem as características elétricas do início do movimento.

Tem-se então:

$$\dot{I}_{1p} = \frac{\dot{V}_1}{r_1 + jx_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_m} + \frac{1}{jX_m} + \frac{1}{r_2' + jx_2'}}} \quad (2.18)$$

$$\dot{I}_{2p}' = \frac{\dot{V}_{th}}{\sqrt{(r_{th} + r_2')^2 + (x_{th} + x_2')^2}} \quad (2.19)$$

$$\cos \phi_p = \frac{(r_{th} + r_2')}{\sqrt{(r_{th} + r_2')^2 + (x_{th} + x_2')^2}} \quad (2.20)$$

$$T_{2p} = r_2' (\dot{I}_{2p}')^2 \quad (2.21)$$

Através da equação (2.18) pode-se verificar processo para a redução da corrente durante a partida, são eles:

- a. Redução da tensão $\dot{V}_{th}$, através da redução de $\dot{V}_1$. Este tipo de partida é normalmente aplicado a motores com rotores em Gaiola de Esquilo. A tensão $\dot{V}_{th}$ pode também ser reduzida através do aumento da resistência ou reatância compreendida entre a fonte e a entrada do motor.
- b. Aumento da resistência (r'_2), com a colocação de resistência em série com o rotor, utilizados em motores de indução com rotor bobinado.
- c. Aumento da reatância (x'_2), este tipo de condição é explorada em motores de indução que contêm duas ou três Gaiolas de Esquilo.

2.3 - Partida com Tensão Plena

Na figura 2.4 tem-se o arranjo físico correspondente a partida direta.

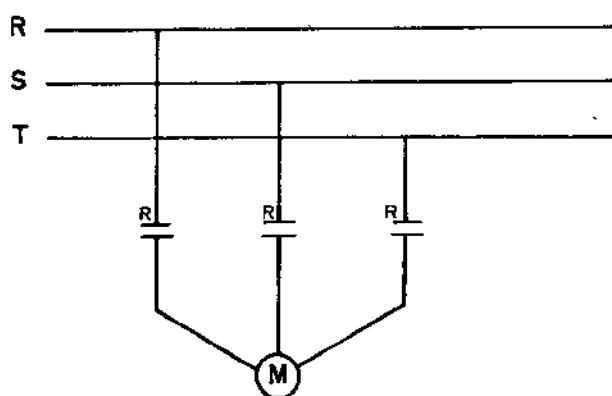


Figura 2.4 - Partida a plena tensão.

Para que seja possibilitada uma, comparação numérica dos métodos de partida serão calculadas várias grandezas típicas para a partida de um motor de indução. Para tanto utilizou-se de um motor de 1000 Hp que possui os seguintes parametros

$$r_1 = 0,02$$

$$r_2 = 0,025$$

$$x_1 = 0,10$$

$$x_2 = 0,15$$

$$s_m = 5,0$$

$$R_m = 100$$

$$KVA_{base} = \text{potência nominal em HP} \times 0,746$$

Através das formulações anteriores, e para o estabelecimento de termos comparativos, determinou-se:

I_{lp} - corrente de partida

T_{2p} - conjugado de partida

s_{Tmax} - escorregamento correspondente ao torque máximo

T_{max} - torque máximo

Os resultados obtidos foram:

I_{lp}	T_{2p} [pu]	s_{Tmax}	T_{max} [pu]
4,00	0,3767	0,1005	1,8214

Com estes dados tem-se então que o motor sob questão, com os parâmetros e características obtidas, conduz a curva de acionamento indicada na figura 2.5.

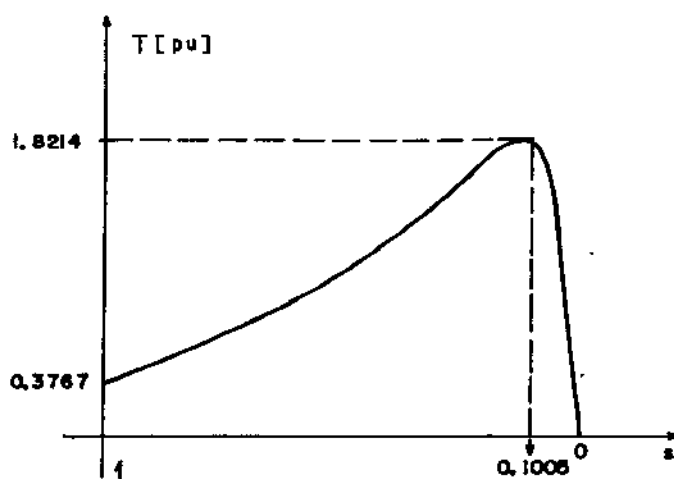


Figura 2.5 - Curva T x s

2.4 - Partida com Tensão Reduzida - Métodos Convencionais

Quando as características da rede de alimentação ou outros consumidores ligados a ela tornam inaceitável a partida direta, usam-se dispositivos de partida destinados a reduzir momentaneamente a tensão nos terminais do motor. Os métodos empregados para tanto são discutidos a seguir.

2.4.1 - Chave Compensadora

A chave compensadora é um dispositivo que reduz a tensão aplicada ao motor durante a partida.

Através de um auto-transformador, como ilustrado na figura 2.6, posição de partida alimenta-se o motor com uma tensão normalmente igual 50%, 65% ou 80% do valor correspondente ao nominal. Pela equação (2.6) uma redução de $\hat{V}_{th}$ devido à redução de $\hat{V}_1$, reduz diretamente I_{lp} . Neste método, tem-se porém, uma redução de T_{2p} , conforme a equação (2.7)

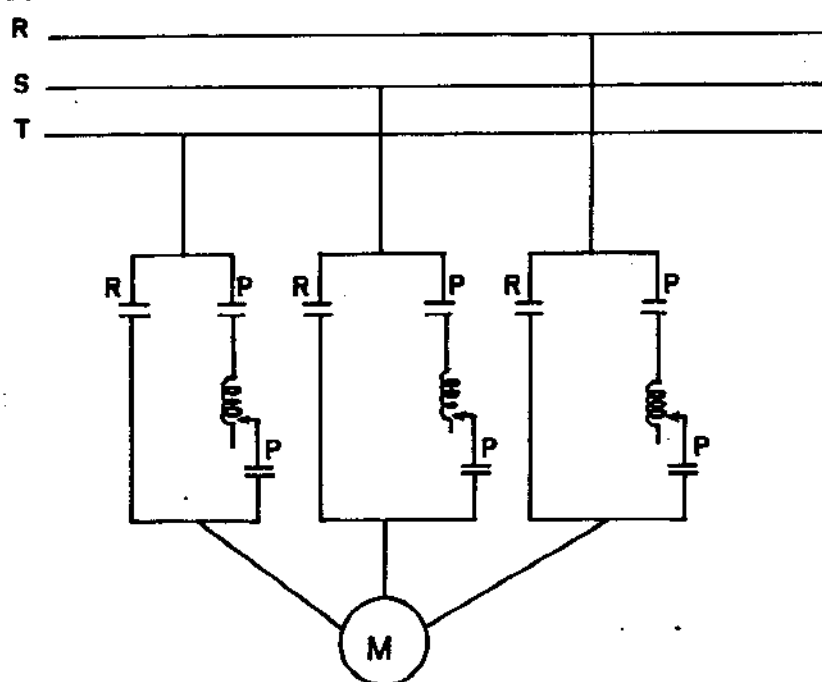
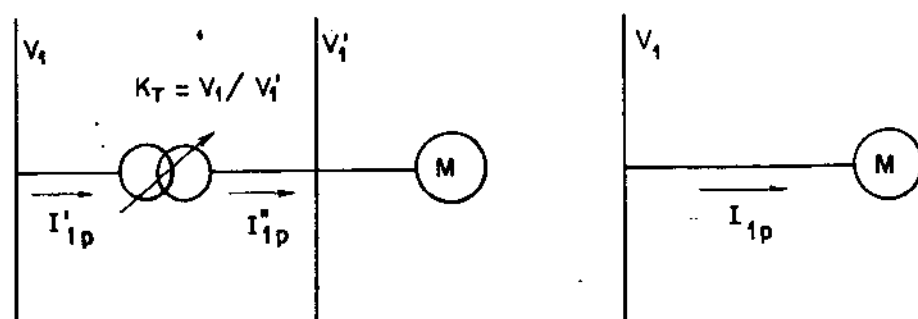


Figura 2.6 - Partida por auto-transformador.

Uma falha deste método está na descontinuidade do suprimento ao se transferir a operação do contator (P) para o (R). Assim, este método é desaconselhável para cargas de alto conjugado de partida e baixo momento de inércia, como é o caso de bombas de alta pressão, pois a desaceleração será grande no intervalo de tempo de passagem de (P) para (R), e, ao fechar (R) estar-se-ia repetindo, praticamente, a ligação direta, tornando ineficiente o processo.

Quanto ao tratamento matemático do efeito do auto-transformador sobre a corrente e torque de partida, seja a figura 2.7, ilustrando o método sob consideração e sua comparação com o método direto.



(a) com auto-transformador

(b) direta

Figura 2.7 - Efeito do auto-transformador sobre a partida

Na figura 2.7:

V_1 = tensão primária

$V'_1 = V_1 / K_T$ = tensão aplicada ao motor, com auto-transformador

K_T = relação de tensão definida pelo tap

I_{1p} = corrente de partida direta

I'_{1p} = corrente primária de partida, com auto-transformador

I''_{1p} = corrente secundária, de partida, com autro-transformador

Considerando que a impedância de partida seja constante para qualquer tensão, então:

$$I_{lp}'' = \frac{I_{lp}'}{K_T} \quad (2.22)$$

e:

$$I_{lp}' = \frac{I_{lp}''}{K_T} = \frac{I_{lp}}{(K_T)^2} \quad (2.23)$$

Este último resultado mostra que, quando um auto-transformador é usado para partida, a corrente que a fonte (V_1) fornece cresce com K_T^2 em relação àquela corrente obtida pela conexão direta de V_1 ao motor.

Como, da equação (2.21), o torque varia de modo quadrático com a tensão aplicada, então, se a tensão aplicada ao motor é reduzida pelo fator K_T , isto resulta em que o torque de partida fica reduzido, também, com K_T^2 , isto é:

$$T_{2p}' = \frac{T_{2p}}{K_T^2} \quad (2.24)$$

Utilizando os dados do motor anterior e sendo empregados os taps de 60 e 80% da tensão dos terminais do estator da máquina, encontrar-se-ia:

V_1'	T_{2p}' [pu]	s_{Tmax}	T_{max} [pu]
0,6V	0,1362	0,1	0,6449
0,8V	0,2422	0,1	1,1465
V	0,3783	0,1	1,87

As curvas $T = f(s)$ correspondentes são representadas na figura 2.8.

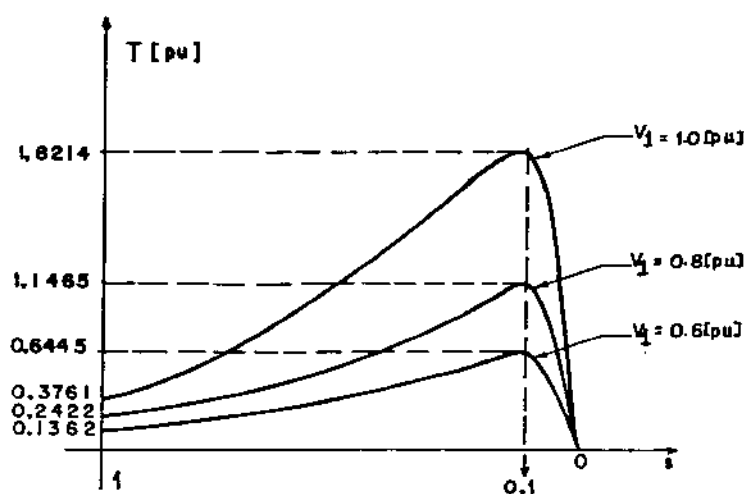


Figura 2.8 - Curvas do acionamento e efeito da redução da tensão através de auto-transformador

2.4.2 - Partida com inserção de resistência no estator

Este método emprega resistores série em cada fase do circuito primário do motor. O valor da resistência é reduzida em um ou mais estágios para satisfazer os requisitos até que a tensão plena seja aplicada aos terminais do motor. Após vencido o transitório de partida, as resistências são curto-circuitadas pelos contadores comandados por um elemento temporizador. As resistências são ligadas conforme mostra a figura 2.9.

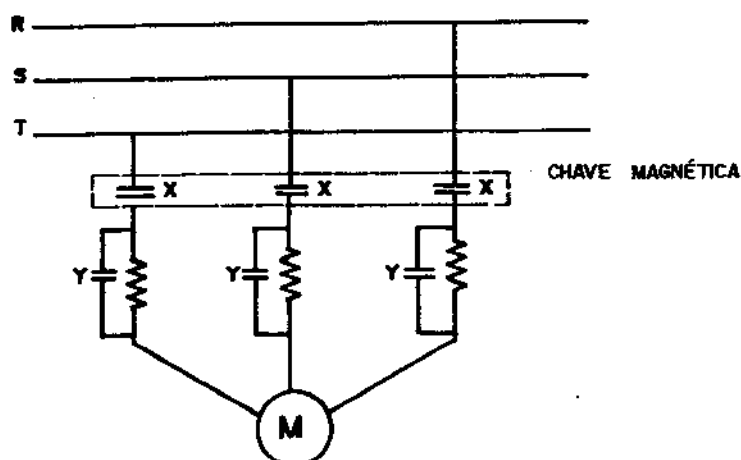


Figura 2.9 - Partida com resistores

Neste caso, tal como no auto-transformador, ocorrendo queda de tensão na resistência, reduzindo a tensão de alimentação de linha na partida, tem-se nos terminais do motor uma tensão reduzida do valor nominal, e conseqüentemente I_{lp} será reduzida, assim como também T_{2p} . O problema deste método está na baixa eficiência, devido a grandes perdas nos resistores, para altos conjugados de partida.

Para se calcular a resistência adicional, a expressão (2.25) sugere uma forma de especificação. Se é desejada uma relação entre a corrente de partida direta (I_{lp}) e aquela com elemento adicional (I''_{lp}) igual a (K_p) , então a resistência adicional será calculada através de:

$$\left(\frac{I_{lp}}{I''_{lp}}\right)^2 = (K'_p)^2 = \frac{(r_1 + r_{AD} + r'_2)^2 + (x_1 + x'_2)^2}{(r_1 + r'_2)^2 + (x_1 + x'_2)^2} \quad (2.25)$$

Quanto ao efeito sobre o torque de partida, chamado T_{2p} o torque sob condições diretas, e T'_{2p} , com o emprego dos elementos adicionais tem-se de (2.26) que:

$$\frac{T_{2p}}{T'_{2p}} = \left(\frac{I_{lp}}{I''_{lp}}\right)^2 = K_p^2 \quad (2.26)$$

Utilizando os dados do motor anterior e sendo utilizado uma resistência de dois estágios de 0,0624 e 0,1656 pu, tem-se:

$R_{AD} [pu]$	$I''_{lp} [pu]$	$T'_{2p} [pu]$	s_{Tmax}	$T'_{max} [pu]$
0,0624	3,7022	0,3426	0,0956	1,3966
0,1656	2,9514	0,2178	0,0806	0,9881

As curvas $T = f(s)$ obtidas são representadas na figura 2.10

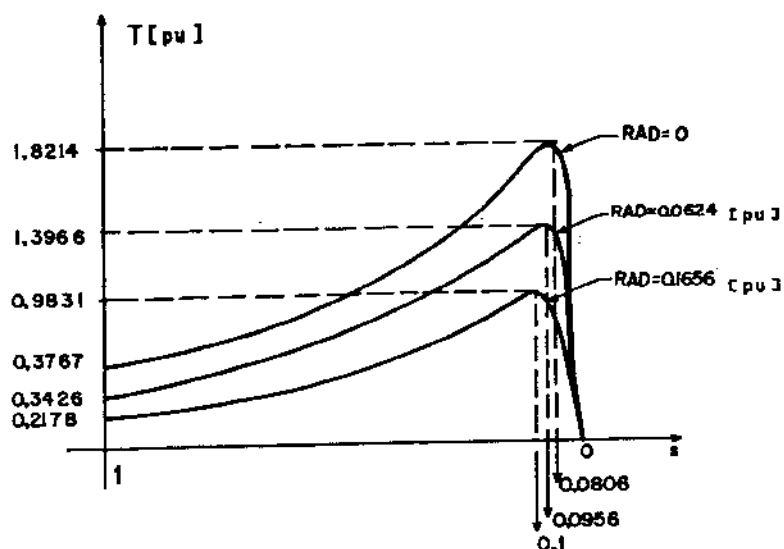


Figura 2.10 - Curvas do acionamento e efeito do resistor adicional ao estator

2.4.3 - Partida com inserção de reator no estator

Este método é bastante semelhante à partida com resistor, se comparado a partida com resistência, o processo apresenta vantagens no que se refere ao consumo de energia.

O maior problema deste método está na redução do fator de potência na partida, já que a corrente de partida é altamente indutiva nos primeiros instantes.

A figura ilustra o método em questão.

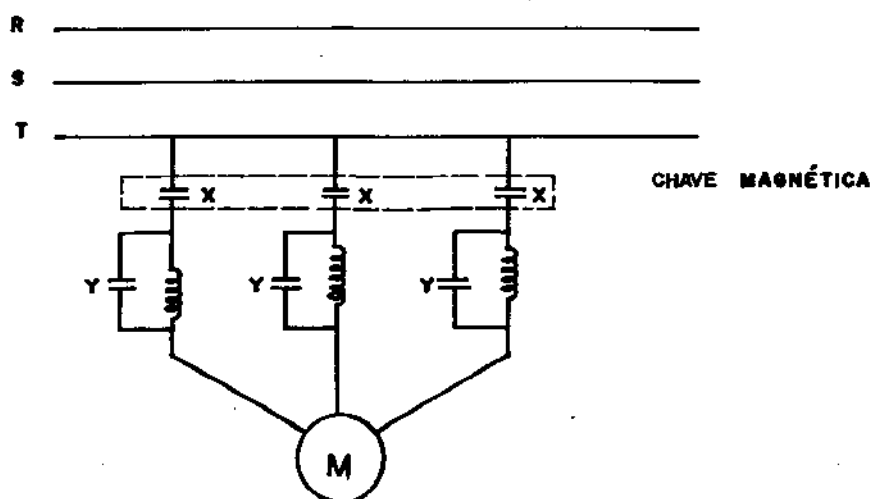


Figura 2.11 - Partida com reator

Para o cálculo da reatância adicional, isto é, a reatância a ser inserida, a expressão (2.16) fornece uma forma de especificação. Se é desejada uma relação entre a corrente de partida direta I'_{2p} e aquela com reator adicional (I'_{2p}) igual a K_P então a reatância adicional será calculada através de:

$$K_P^2 = \frac{(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_{AD} + x_2')^2}{(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2} \tag{2.27}$$

Quanto ao efeito sobre o torque de partida, sendo T_{2p} o torque sob condições diretas e T'_{2p} com o emprego de elementos adicionais, utilizando os dados do motor anterior na equação (2.26) empregando-se reatores de 0,0624 e 0,1656 pu têm-se:

x_{AD} [pu]	I''_{lp} [pu]	T'_{2p} [pu]	s_{Tmax}	T'_{max}
0,0624	1,0907	0,2974	0,0812	1,422
0,1656	0,9127	0,1082	0,0621	0,5234

As curvas do acionamento descrito são representadas na figura 2.12 abaixo.

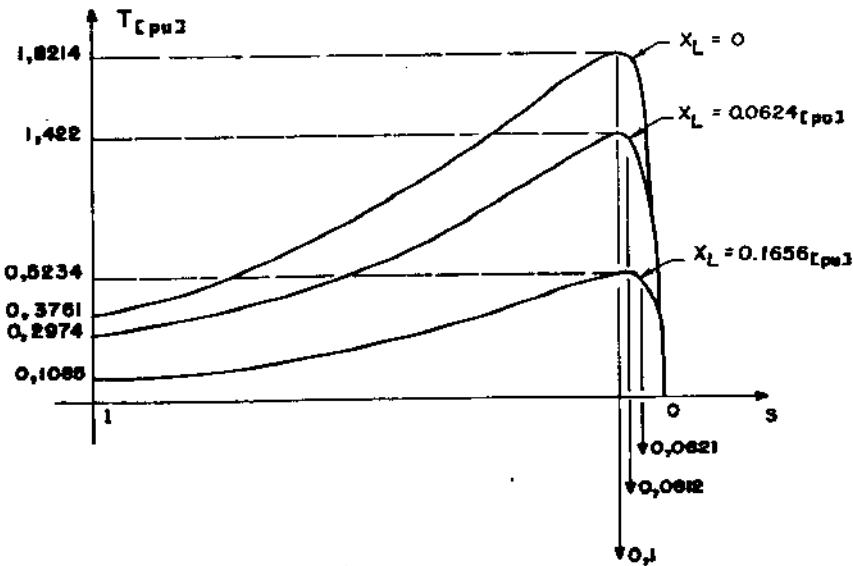


Figura 2.12 - Curva do acionamento e efeito do reator adicional ao estator.

2.4.4 - Partida através da chave estrela-triângulo

Quando a chave é um dispositivo que conecta os enrolamentos do motor em estrela durante a partida e após um período sumário para que a velocidade se aproxime da nominal, comuta as ligações para triângulo. Isto implica em que a tensão por fase, na ligação de partida (estrela), é $(1/\sqrt{3})$ vezes a tensão da linha da rede. Na ligação de funcionamento (triângulo), a tensão por fase é igual à tensão de linha.

Para que a operação seja possível, é preciso que os enrolamentos tenham terminais independentes de modo que possam ser conectados nas duas ligações. Isto ocorre naturalmente em motores de tensão nominal dupla, em que as duas tensões guardam entre si a relação $(1/\sqrt{3})$.

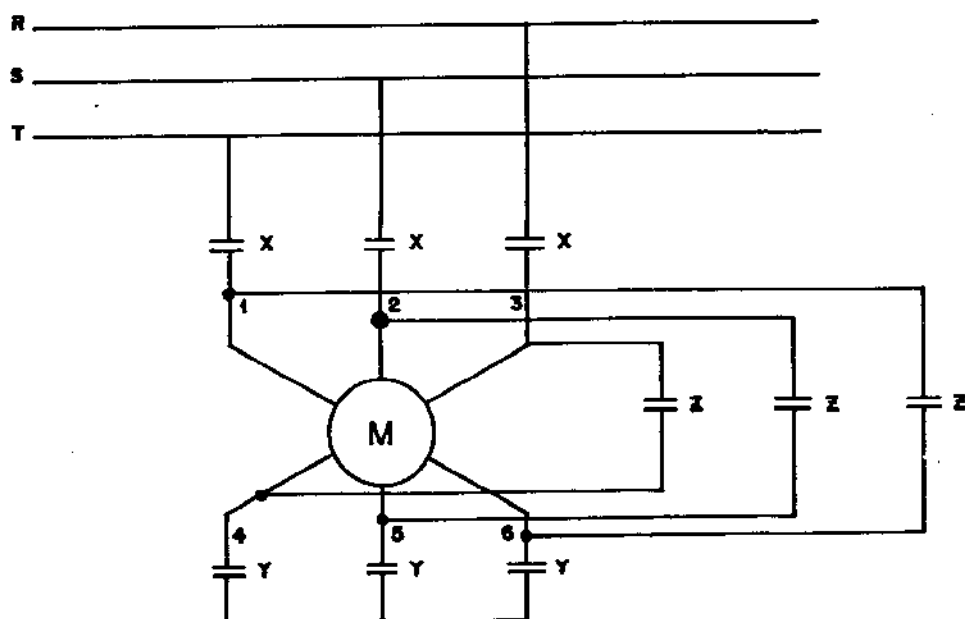


Figura 2.12 - Partida estrela-triângulo

Utilizando o dispositivo mencionado e os dados do motor anterior chega-se aos resultados a seguir.

I_{lp} [pu]	T'_{2p} [pu]	s_{Tmax}	T'_{mas}
1,294	0,0419	0,1005	1,1214

As curvas do acionamento são representadas na figura 2.13.

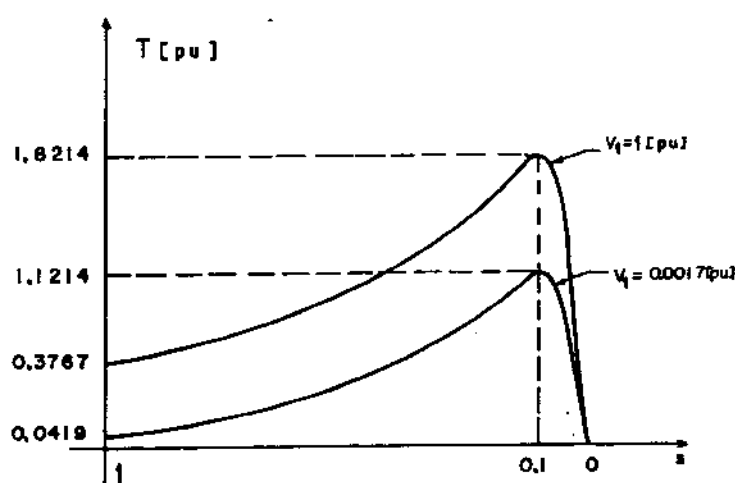


Figura 2.13 - Curvas do acionamento e efeito das mudanças nas ligações do estator do motor

2.5 - Partida com inserção de resistência rotórica (rotor em anéis)

De acordo com exigências impostas pela carga, e pelo sistema de alimentação, ou pelo próprio motor, aconselha-se o uso de motores de anéis. Nestes, o rotor é bobinado e o enrolamento trifásico é acessível através de anéis de deslizamento e escovas, possibilitando assim a ligação de um resistor variável, ao enrolamento do rotor.

A redução da corrente de partida pode ser conseguida sem prejuízo do conjugado. Com o valor da resistência escolhido e controlando sua variação de maneira adequada, pode-se conseguir uma característica conjugado x escorregamento apropriada à aplicação,

mantendo-se a corrente dentro de limites toleráveis.

A representação do motor de indução com anéis é feita na figura 2.14.

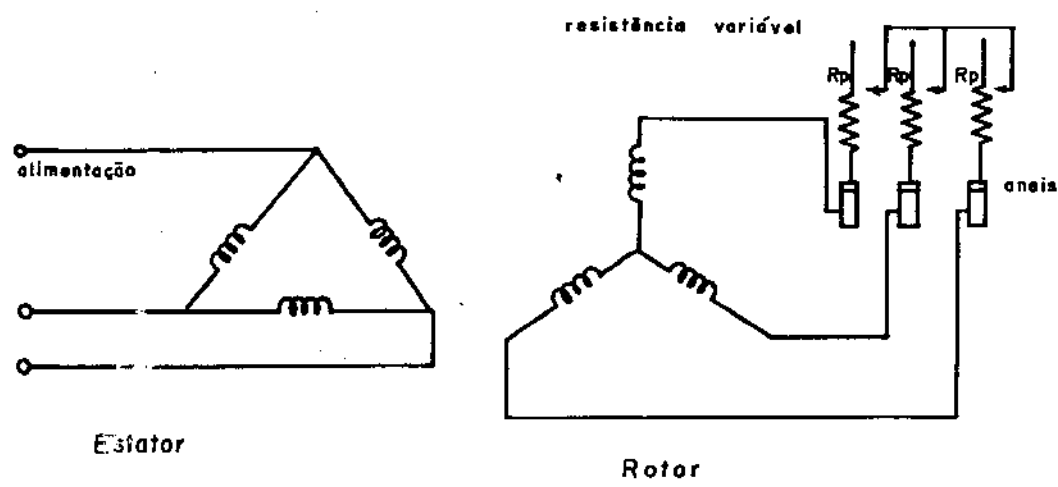


Figura 2.14 - Motor de rotor bobinado

Utilizando os dados do motor anterior com uma resistência rotórica de 0,378 pu , obteve-se:

R_p [pu]	I_{1p} [pu]	T_{2p} [pu]	s_{Tmax}	T_{max} [pu]
0	4,00	0,3767	0,1005	1,8214
0,378	1,9387	1,61	0,169	1,8214

As curvas do acionamento são representadas na figura 2.15, obtidas respectivamente com $R_p = 0$ e $R_p = 0,378$ [pu].

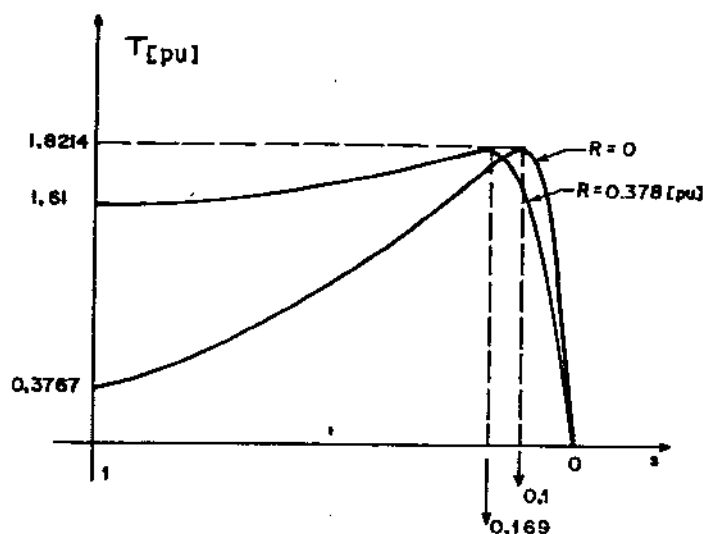


Figura 2.15 - Curvas do acionamento considerando o efeito da inserção de resistência rotórica

2.6 - Motor de indução com gaiola dupla

Para melhorar as condições de partida, embora com custo relativamente alto, é comum o uso de motores com duas gaiolas ou gaiola dupla. Este tipo especial de motor, como o próprio nome diz, possui um rotor formado por dois enrolamentos em gaiolas dispostas numa mesma ranhura, um sobre o outro, porém com características bastante diferentes, conforme ilustra a figura 2.16.

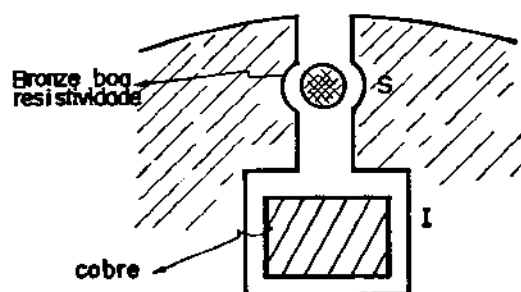


Figura 2.16 - Construção básica do rotor de um motor de indução com gaiola dupla.

Devido à posição física e dimensões dos condutores tem-se que:

$L_i > L_s$ - indutância do condutor inferior maior que a indutância do condutor superior.

$r_s \geq r_i$ - resistência do condutor superior maior que a resistência do condutor inferior.

Como na partida a frequência da tensão ou corrente no rotor é igual à do estator, as reatâncias ali localizadas passam por seu máximo valor, neste instante, e, considerando os circuitos magnéticos para a barra superior e inferior pode-se afirmar que:

$$x_{ip} \gg x_{sp}$$

Embora $r_s > r_i$, devido a uma predominância total das reatâncias, a impedância:

$$z_{ip} \gg z_{sp}$$

Isto fará com que quase toda corrente inicial seja conduzida pela gaiola superior, de alta resistência e, portanto, com as vantagens já citadas.

À medida que o motor acelera, a frequência f_2 cai até um valor muito baixo, caracterizando o regime nominal de operação. Nestas circunstâncias as reatâncias caem bastante, e, as resistências r_i e r_s passam a definir os parâmetros do circuito. Assim:

$$z_{in} \ll z_{sn}$$

Como consequência disto, a distribuição de corrente se inverte, de tal maneira que quase toda ela é conduzida pelo enrolamento rotórico inferior, de baixa resistência.

Proporcionando-se, pois, no projeto, uma forma adequada às ranhuras do rotor e calculando as resistências relativas às duas gaiolas, é possível obter um elevado conjugado de partida com uma

moderada corrente correspondente e, devido à baixa resistência em regime nominal, um alto rendimento.

2.7 - *Comparação entre os Diversos Métodos*

O critério para a seleção dentre de partida os diferentes métodos de partida é baseado no torque desenvolvido neste período, de modo a permitir uma aceleração adequada da máquina, sem que isto traga distúrbios a níveis inaceitáveis para a rede de alimentação.

2.7.1 - *Método Direto*

Usado para motores de até 5 Hp, excepcionalmente até 20 Hp, em rede bem dimensionada.

Este processo conduz a altas correntes de partida, variando de 4 a 7 vezes a nominal, que podem, para o caso de grandes motores, afetar consideravelmente o sistema, ocasionando:

- Oscilação no sistema de iluminação;
- Queda de tensão e seus efeitos na operação de outros motores no sistema.

Por outro lado, o conjugado ou torque de partida é elevado, o que é vantajoso para uma rápida aceleração da máquina.

O quadro a seguir ilustra como se comportam os diferentes tipos de motores analisados, quando estes são alimentados à tensão plena no processo de partida.

Tipo de motor	I_{lp}/I_p	T_{2p}/T_{2n}
gaiola dupla	4 a 5	2
gaiola simples	6 a 7	1,2
anéis - com resistência do rotor para per mitir $I_{lp} = I_n$	1	1

2.7.2 - Auto-transformador

Este método, quando utilizado para motores médios, requer taps de 65 a 80%. Para grandes motores deverá também ser proporcionado um tap de 50%.

Através da expressão (2.21) pode-se concluir que o torque de partida fica substancialmente reduzido, resultando daí que o método do auto-transformador fica restrito aos casos onde o torque resistente de partida seja pequeno.

2.7.3 - Resistência ou Reatância adicional inserida no Circuito do Estator

É o método mais indicado até a potência de 5 Hp, pois proporciona o melhor fator de potência, o que conduz a uma aceleração mais suave, maior facilidade de controle e menor preço.

O método com reator também é aplicado para pequenos, médios e grandes motores, seu custo é aproximado ao da chave compensadora, sendo seu funcionamento limitado pelo aquecimento dos reatores. Neste caso tem-se um aproveitamento das condições do fator de potência do motor na partida.

Pela inserção de um elemento adicional pode-se concluir que haverá uma diminuição de I'_{lp} e T'_{2p} . Atitude de ilustração se um

motor tem para a partida $I'_{lp} = 6.I_n$ e $T'_{2p} = 1,4.T_{2n}$, se a corrente I'_{lp} é reduzida para $3.I_n$, o conjugado T'_{2p} será inferior a $0,4.T_{2n}$. Consequentemente, o processo é admissível nos casos onde o valor do torque de arranque não é essencial.

2.7.4 - Chave Y - Δ

Conforme foi abordado, o processo pode ser encarado como um caso particular, onde a redução de tensão correspondente a $\sqrt{3}$ do valor nominal. Isto proporciona as relações:

$$\frac{I'_{lp}}{I_{lp}} = \frac{1}{3} \quad (2.24)$$

$$\frac{T_{2p}(Y)}{T_{2p}(\Delta)} = \frac{1}{3} \quad (2.25)$$

2.8 - Considerações Gerais

Os métodos convencionais de partida, aplicados a motor de indução com rotor em gaiola de equilo, apresentam inconvenientes devido a redução do torque durante o período de partida.

Com a utilização do motor de indução com rotor bobinado, tem-se a melhoria do torque, bem como redução da corrente durante o período de partida, através do controle da resistência colocada em série com o rotor.

Todos os métodos estudados tem como objetivo reduzir a influência das partidas dos motores sobre o sistema de alimentação, evitando problemas na alimentação de outras cargas.

CAPÍTULO III

PARTIDA DO MOTOR DE INDUÇÃO COM A UTILIZAÇÃO DE CAPACITORES

3.1 - Introdução:

Como visto anteriormente, os problemas causados pela partida de motores estão associados com a potência reativa requerida pelo motor. Assim, fornecendo os reativos através de dispositivos conectados próximos do motor, estar-se-á aliviando a rede e por consequência reduzindo os efeitos negativos criados. Uma proposta para atingir este intento seria a conexão de um banco de capacitores junto aos terminais de alimentação do motor, conforme ilustrado na figura 3.1. A figura representa o circuito equivalente, por fase, do motor, incluindo o capacitor de partida (4), (5) e (6).

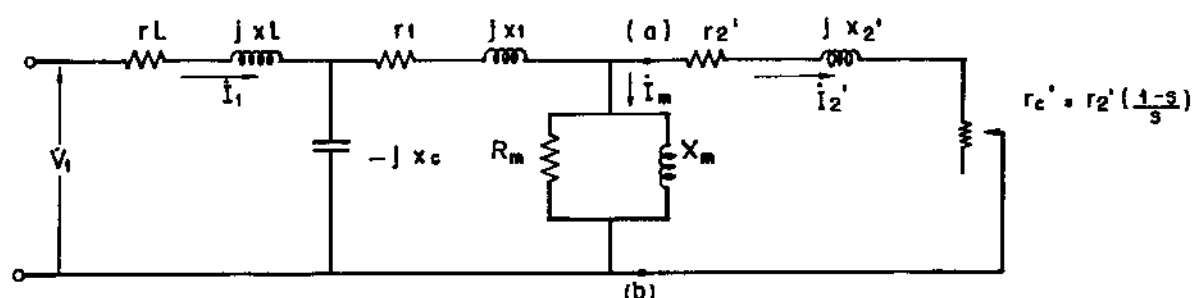


Figura 3.1. Circuito equivalente completo por fase do MIT

Com a utilização da figura 3.1 calcula-se a corrente I_1 através da equação (3.1):

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_1}{r_L + jX_L + \frac{1}{-jx_c} + \frac{1}{r_1 + jX_1 + \frac{1}{R_m} + \frac{1}{j'X_m} + \frac{1}{r_2'/s + j'X_2'}}$$

Utilizando um equivalente de Thévenin, obtido entre a entrada e os pontos "a e b" obtem-se:

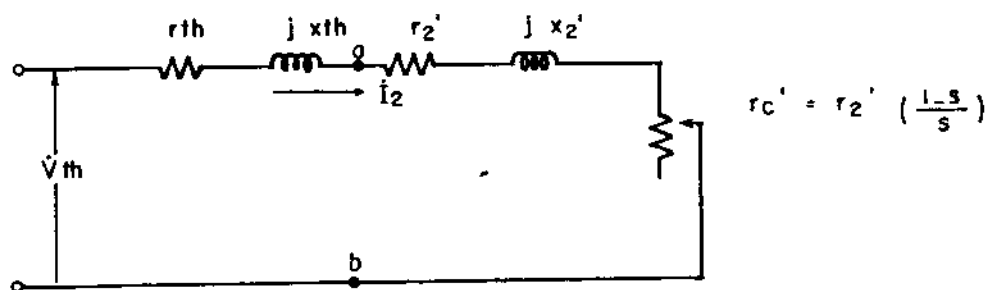


Figura 3.2. Circuito equivalente de Thévenin

onde:

$$z_{th} = \frac{\left[\left(\frac{r_L j x_L}{r_L + j(x_L - x_C)} \right) + r_1 + j x_1 \right] \left(\frac{R_m j x_m}{R_m + j x_m} \right)}{\left[\left(\frac{r_L + j x_L}{r_L + j(x_L - x_C)} \right) + r_1 + j x_1 + \frac{R_m j x_m}{R_m + j x_m} \right]} = r_{th} + j x_{th} \quad (3.2)$$

$$\dot{V}_{th} = \frac{V_f \left[\frac{R_m j x_m}{R_m + j x_m} \right]}{(r_L + j x_L) + \left(\frac{R_m j x_m}{R_m + j x_m} \right) - j x_C} \quad (3.3)$$

$$(r_L + j x_L) \left[\frac{-j x_C}{-j x_C} \right] + r_1 + j x_1 + \frac{R_m j x_m}{R_m + j x_m}$$

Do circuito da figura 3.2, tem-se:

$$\dot{I}_2' = \frac{\dot{V}_{th}}{\sqrt{(r_{th} + r_2' + r_c')^2 + (x_{th} + x_2')^2}} = \frac{\dot{V}_{th}}{\sqrt{(r_{th} + r_2'/s)^2 + (x_{th} + x_2')^2}} \quad (3.4)$$

A partir das expressões da página anterior e do circuito equivalente da figura 3.2, pode-se obter a expressão do torque desenvolvido no rotor, o ponto será dado por:

$$T_2 = \frac{V_{th}^2 r_2' s}{[(r_{th} s + r_2')^2 + (x_{th} + x_2')^2]} \quad (3.5)$$

O escorregamento máximo é obtido através da determinação do escorregamento correspondente ao torque máximo (s_{Tmax}) com o uso da equação (3.6).

$$s_{Tmax} = \frac{r_2'}{\sqrt{(r_{th})^2 + (x_{th} + x_2')^2}} \quad (3.6)$$

A expressão (3.6) em (3.5) fornece $T_{m\acute{a}x}$.

Para as condições de partida (s e l) pode-se definir as seguintes expressões:

$$\dot{i}_{1p} = \frac{\dot{V}_1}{r_L + jx_L + \frac{1}{-jx_C} + \frac{1}{r_1 + jx_1 + \frac{1}{(1/R_m + 1/jX_m + 1/r_2' + jx_L)}}} \quad (3.7)$$

$$\dot{i}_{2p} = \frac{\dot{V}_{th}}{\sqrt{(r_{th} + r_2')^2 + (x_{th} + x_2')^2}} \quad (3.8)$$

$$\cos \phi_p = \frac{(r_{th} + r_2')}{\sqrt{(r_{th} + r_2')^2 + (x_{th} + x_{2p}')^2}} \quad (3.9)$$

$$T_{2p} = r_2' \dot{I}_{2p}'^2 \quad (3.10)$$

Com o uso da formulação desenvolvida anteriormente e utilizando-se dos dados de um motor de 1000 Hp, cujos valores são:

$$x_1 = 0,15[\text{pu}], \quad x_2 = 0,15[\text{pu}], \quad x_m = 5,0[\text{pu}], \quad R_m = 100[\text{pu}],$$

$r_1 = 0,02[\text{pu}], \quad r_2 = 0,025[\text{pu}],$ pode-se proceder a uma análise numérica cujo objetivo é ilustrar o procedimento analítico para a especificação do capacitor de partida.

S_{base} = potência nominal em Hp do motor

Sendo a resistência e reatância da linha de alimentação respectivamente 0,03 [pu] e 0,2 [pu], tem-se então:

X_c	I_{1p} [pu]	T_{2p} [pu]	$s_{T_{\max}}$	$T_{\max}$ [pu]
-j2	1,9944	0,0224	0,0243	0,5
∞	0,9452	0,091	0,1583	0,3529

Com estes dados, tem-se com as curvas de acionamento indicadas na figura 3.3.

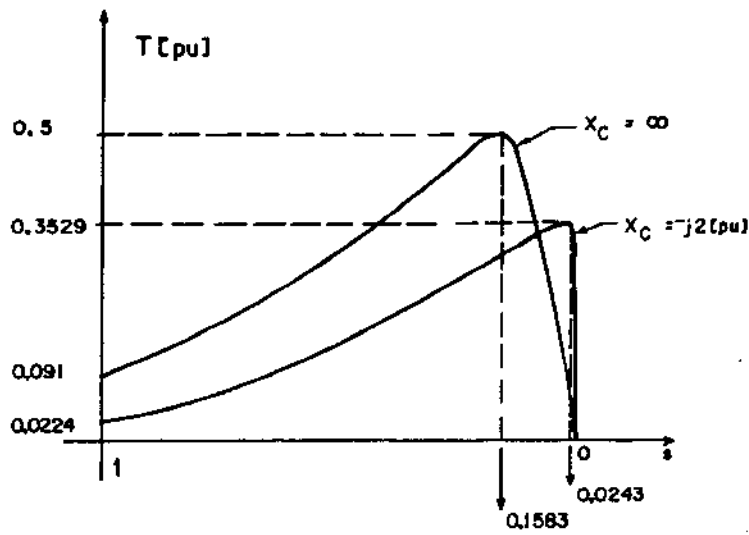


Figura 3.3 - Partida com utilização de capacitor

Do exposto, verifica-se que com este método de partida não há redução do torque de partida; além do que, há um aumento da região de operação do motor de indução.

Para o sistema de potência, a partida com capacitor representa uma redução da corrente de partida, e por consequência, do cancelamento de boa parte da potência reativa solicitada do sistema durante o período de aceleração do motor.

3.2 - Cálculo do Capacitor de Partida

A utilização do capacitor de partida modifica a configuração de tensão nos terminais da máquina, como mostra as figuras 3.4. [10].

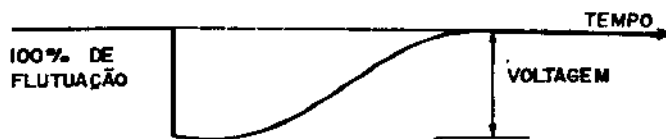


Figura 3.4.a - Partida sem capacitor

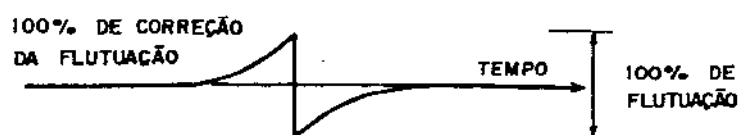


Figura 3.4.b - Partida com 100% de correção da flutuação

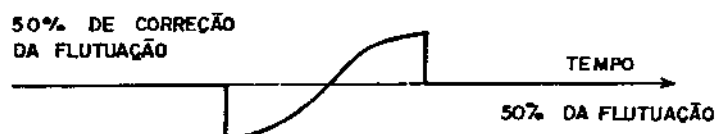


Figura 3.4.c - Partida com 50% de correção da flutuação

Figura 3.4 - Configuração para tipos diferentes de compensação.

Na figura 3.4.a verifica-se a flutuação de 100% para a partida direta do motor no sistema causando todos os inconvenientes anteriormente discutidos, [6], [5], [4], [8].

Para a configuração de correção de 100% da flutuação como mostrado na figura 3.4.b, verifica-se que em regime permanente de operação do motor, tem-se uma sobre elevação de tensão nos terminais da máquina.

Uma configuração intermediária seria mais conveniente como mostra a figura 3.4.c onde se corrige 50% da flutuação, sendo o motor em regime permanente de operação sujeito a uma pequena elevação de tensão.

Portanto este estudo pode ser estendido de forma a buscar' o capacitor que, colocado na partida, leve à correção razoável da flutuação ocorrida neste período no sistema e, estando este em operação em regime permanente, provoca-se a menor sobre elevação nos terminais da máquina.

Na impossibilidade de que isto ocorra, pede-se utilizar chaveamentos necessários, com a colocação de capacitores de maior capacitância na partida e a consequente utilização de bancos menores durante o período de aceleração, permitindo somente o mínimo de reativos em regime de operação normal.

Para a análise desse problema, desenvolveu-se uma formulação que estuda o comportamento da flutuação de tensão na linha de alimentação do motor, durante o período de aceleração, quando se utiliza o capacitor de partida, comparando esta flutuação com a que ocorre durante a partida sem o capacitor.

3.2.1 - Determinação da Flutuação de Tensão sem Capacitor

Analisando o motor partindo sem capacitor e utilizando o circuito equivalente, calcula-se a flutuação ocorrida na linha de alimentação, segundo a figura 3.5.

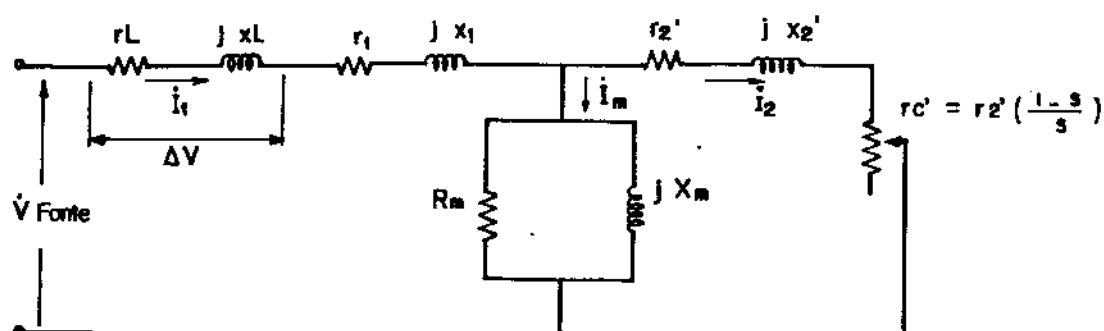


Figura 3.5. Flutuação ocorrida na linha

Cálculo do $\dot{z}_{\text{motor}}$ para um escorregamento (s), que varia entre 0-1 .

$$\dot{z}_{\text{motor}} = r_1 + jx_1 + \frac{jR_m x_m (r_2'/s + jx_2')}{jR_m x_m + (r_2'/s + jx_2') (R_m + jx_m)} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \dot{z}_{\text{motor}} = \{r_1 + [& \frac{-R_m x_m x_2' (R_m r_2'/s - x_2' x_m) + R_m x_m r_2'/s (R_m x_m + R_m x_2' + r_2'/s)}{(R_m r_2'/s - x_2' x_m)^2 + (R_m x_m + R_m x_2' + r_2'/s x_m)^2}] \} \\ j\{x_1 + [& \frac{R_m x_m r_2'/s (R_m r_2'/s - x_2' x_m) + R_m x_m x_2' (R_m x_m + R_m x_2' + r_2'/s)}{(R_m r_2'/s - x_2' x_m)^2 + (R_m x_m + R_m x_2' + r_2'/s x_m)^2}] \} \end{aligned} \quad (3.12)$$

tem-se então:

$$\dot{z}_{\text{motor}} = r_{\text{motor}} + jx_{\text{motor}} \quad (3.13)$$

onde:

$$r_{\text{motor}} = \{r_1 + [\frac{A + r_2'/s(B)}{C + D r_2'/s + T}]\}$$

$$x_{\text{motor}} = \{x_1 + [\frac{F + P r_2'/s + H}{C + D r_2'/s + T}]\}$$

onde:

$$A = x_2'^2 x_m^2 R_m$$

$$B = x_m^2 R_m + R_m^2 x_m + R_m^2 x_m^2 - x_2' x_m R_m$$

$$C = R_m^2 + x_m^2$$

$$D = 2[(R_m x_m + R_m x_2' R_m)]$$

$$F = (R_m^2 + x_m^2)$$

$$G = (R_m^2 x_2'^2 x_m + x_m^2 R_m^2 x_2')$$

$$P = (R_m x_2' x_m^2 - x_m^2 R_m)$$

$$T = x_2'^2 x_m^2 + (R_m x_m + R_m x_2')^2$$

Portanto, com a figura 3.6, pode-se calcular I_1 para cada escorregamento durante a partida e aceleração do motor, calculando, por conseguinte, a flutuação na linha de alimentação.

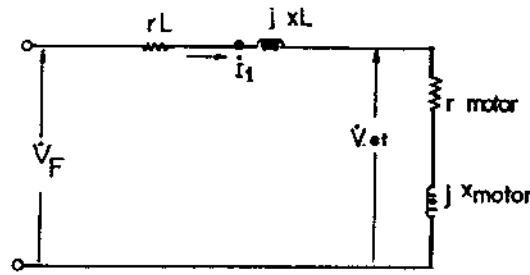


Figura 3.6. Circuito para cálculo de I_1 x s

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_F}{r_L + jx_L + r_{\text{motor}} + jx_{\text{motor}}} = \frac{\dot{V}_F}{(r_L + R_{\text{motor}}) + j(x_L + x_{\text{motor}})} \quad (3.14)$$

Para o cálculo da flutuação tem-se que:

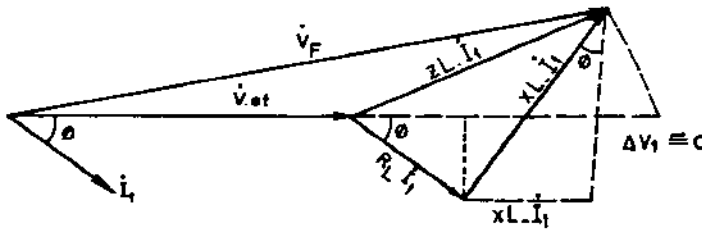


Figura 3.7. Diagrama fasorial para cálculo da flutuação

$$Z_L \dot{I}_1 = \Delta V = R_L \dot{I}_1 \cos \phi + X_L \dot{I}_1 \sin \phi + \Delta V_1$$

como $\Delta V_1 \approx 0$

$$\Delta V = R_L \dot{I}_1 \cos \phi + X_L \dot{I}_1 \sin \phi \quad (3.15)$$

Portanto para cálculo da flutuação utiliza-se a equação

(3.15).

3.2.2 - Determinação da Flutuação de Tensão com Capacitor

Analisando a partida com capacitor, representada na figura 3.8 onde o Z_{motor} é o mesmo desenvolvido na equação (3.11).

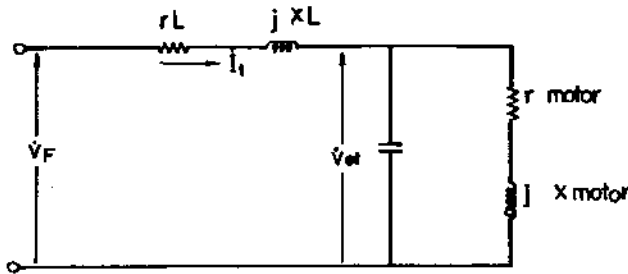


Figura 3.8. Partida com capacitor

Calcula-se a corrente I_1 para cada escorregamento do motor, utilizando vários capacitores, calculando para cada um deles a flutuação na linha de alimentação, na partida, durante o período de aceleração e em regime de operação normal.

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{\dot{V}_f}{(r_L + jx_L) + \frac{(-jx_c)(r_{\text{motor}} + jx_{\text{motor}})}{r_{\text{motor}} + j(x_{\text{motor}} - x_c)}} = \\ &= \frac{\dot{V}_f}{(r_L + jx_c) + \frac{(x_c x_{\text{motor}} - jx_c r_{\text{motor}})}{r_{\text{motor}} + j(x_{\text{motor}} - x_c)}} \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_f}{x_L + [M + jN]}$$

onde:

$$M = \left[\frac{(r_{\text{motor}} x_{\text{motor}} x_c) - (x_{\text{motor}} - x_c)(x_c x_{\text{motor}})}{r_{\text{motor}}^2 + (x_{\text{motor}} - x_c)^2} \right]$$

$$N = x_L - \left[\frac{(x_c R_{\text{motor}})(r_{\text{motor}}) * (x_{\text{motor}} x_c)(x_{\text{motor}} - x_c)}{r_{\text{motor}}^2 + (x_{\text{motor}} - x_c)^2} \right] \quad (3.17)$$

fazendo:

$$r_{\text{sist}} = \{ r_L + \left[\frac{(r_{\text{motor}} x_{\text{motor}} x_c) - (x_{\text{motor}} - x_c)(x_c r_{\text{motor}})}{r_{\text{motor}}^2 + (x_{\text{motor}} - x_c)^2} \right] \}$$

$$x_{\text{sist}} = \{ x_L + \left[\frac{(x_c r_{\text{motor}})(r_{\text{motor}}) + (x_{\text{motor}} x_c)(x_{\text{motor}} - x_c)}{r_{\text{motor}}^2 + (x_{\text{motor}} - x_c)^2} \right] \}$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_f}{\sqrt{r_{\text{sist}}^2 + x_{\text{sist}}^2}} \quad (3.18)$$

portanto a flutuação será:

$$\Delta V = r_L \dot{I}_1 \cos \phi + x_L \dot{I}_1 \sin \phi \quad (3.19)$$

Pode-se então, com as equações apresentadas, montar tabelas onde verifica-se o fator de potência do motor, a corrente de linha e a flutuação na linha. Em função do escorregamento do motor, especifica-se o capacitor único ou os vários a serem chaveados.

Com a utilização do motor com os parâmetros característicos fornecidos anteriormente tem-se:

$$r_{\text{motor}} = \{ 0,02 + \left[\frac{375 + 1/s(7560,6250)}{\frac{6,2656}{s^2} + \frac{72,5}{s} + 265225,56} \right] \} \quad [\text{pu}]$$

$$x_{\text{motor}} = \{ 0,01 + \left[\frac{1/s^2 31,25 + 1/s 53,125 + 1200}{\frac{6,2656}{s^2} + \frac{72,5}{s} + 265225,56} \right] \} \quad [\text{pu}]$$

$$\text{Sendo } z_L = 0,03 + j0,2 \quad [\text{pu}]$$

s	r_{motor}	x_{motor}	I_1 $x_c = \infty$	I_1 $x_c = -j2,0$	I_1 $x_c = -j1,5$	I_1 $x_c = -j1,0$	I_1 $x_c = -j0,5$	I_1 $x_c = -j0,35$	I_1 $x_c = -j0,23$	I_1 $x_c = -j0,18$	I_1 $x_c = -j0,15$
1	0,0499	0,1048	7,8842	7,4843	7,3722	7,1169	6,3687	6,0713	4,7564	4,0979	3,7032
0,9	0,0531	0,1049	7,7842	7,4062	7,3675	7,0276	6,2981	5,6871	4,7409	4,1304	3,7833
0,8	0,0570	0,1049	7,6672	7,2950	7,1716	6,9243	6,2097	5,6244	4,7232	4,1619	3,9698
0,7	0,0621	0,1050	7,5075	7,1410	7,0225	6,7810	6,0859	5,5348	4,6956	4,212	4,0638
0,6	0,0689	0,1052	7,2905	6,9358	6,8201	6,5875	5,9261	5,4127	4,6543	4,2785	4,1737
0,5	0,0784	0,1054	6,9931	6,6547	6,5408	6,3223	5,7018	5,2332	4,6145	4,3578	4,4072
0,4	0,0926	0,1057	6,5613	6,2437	6,1481	5,9405	5,3876	4,7807	4,5515	4,3806	4,6961
0,3	0,1272	0,1065	5,616	5,3458	5,2538	5,1005	4,5113	4,5005	4,448	4,7479	5,2465
0,2	0,1637	0,1084	4,7952	4,5679	4,4988	4,3757	4,1251	4,08	4,3779	5,0155	5,6404
0,1	0,305	0,1182	2,9501	2,8214	2,3744	2,7712	2,9217	3,3297	4,3348	5,2874	6,3055
0,01	2,2771	0,9887	0,4009	0,6769	0,6708	0,9193	0,6708	2,7626	4,3109	5,5274	6,7847

Tabela 3.1. $I \times s$

s	fp $x_c = \infty$	fp $x_c = -j2,0$	fp $x_c = -j1,5$	fp $x_c = -j1,0$	fp $x_c = -j0,5$	fp $x_c = -j0,35$	fp $x_c = -j0,23$	fp $x_c = -j0,18$	fp $x_c = -j0,15$
1	0,4299	0,4541	0,4616	0,4797	0,5389	0,4835	0,7343	0,8574	0,9581
0,9	0,4516	0,4766	0,4616	0,5033	0,5662	0,6308	0,7642	0,8826	0,9730
0,8	0,4774	0,5019	0,5124	0,5319	0,5984	0,6636	0,7989	0,9121	0,9850
0,7	0,5091	0,5330	0,5466	0,567	0,6296	0,705	0,8398	0,9414	0,9964
0,6	0,5479	0,5783	0,5842	0,6102	0,6831	0,7549	0,8834	0,9699	1,0
0,5	0,5968	0,6296	0,6408	0,6645	0,7417	0,8128	0,9325	0,9954	0,9923
0,4	0,6585	0,6945	0,7084	0,7329	0,8137	0,8825	0,9779	0,999	0,9624
0,3	0,7667	0,8081	0,8078	0,8495	0,9272	0,9773	0,9946	0,9396	0,8557
0,2	0,8338	0,8782	0,895	0,9158	0,9821	0,9992	0,9404	0,8395	0,7427
0,1	0,9324	0,9782	0,9884	0,9993	0,9540	0,8366	0,1847	0,5396	0,4562
0,01	0,9173	0,5299	0,7629	0,4028	0,1968	0,1345	0,0878	0,0681	0,0567

Tabela 3.2. fp x s

s	$x_c = \infty$	ΔV $x_c = -j2,0$	ΔV $x_c = -j1,5$	ΔV $x_c = -j1,0$	ΔV $x_c = -j0,5$	ΔV $x_c = -j0,35$	ΔV $x_c = -j0,23$	ΔV $x_c = -j0,18$	ΔV $x_c = -j0,15$
1	0,0837	0,0807	0,0798	0,0778	0,0719	0,0665	0,0574	0,0499	0,0429
0,9	0,0838	0,0809	0,0798	0,0779	0,0720	0,0668	0,0576	0,0500	0,0429
0,8	0,0838	0,0808	0,0798	0,0779	0,0720	0,0668	0,0576	0,0499	0,0439
0,7	0,0834	0,0803	0,0795	0,0775	0,0714	0,0665	0,0573	0,0495	0,0429
0,6	0,0826	0,0797	0,0786	0,0767	0,0708	0,0637	0,0564	0,0488	0,0417
0,5	0,0810	0,0781	0,07771	0,0751	0,0690	0,0639	0,0547	0,0463	0,0399
0,4	0,0778	0,0748	0,0739	0,0718	0,0658	0,0579	0,0512	0,0424	0,0363
0,3	0,0683	0,0652	0,0641	0,0623	0,0536	0,0506	0,0410	0,0332	0,0259
0,2	0,0585	0,0554	0,0543	0,0523	0,0459	0,0404	0,0307	0,0230	0,0154
0,1	0,0275	0,0317	0,0260	0,0284	0,0217	0,0154	0,0218	-0,0263	-0,0105
0,01	0,0048	0,0004	0,0019	-0,0022	-0,0033	-0,0154	-0,0263	-0,0348	-0,0436

Tabela 3.3. $\Delta V \times s$

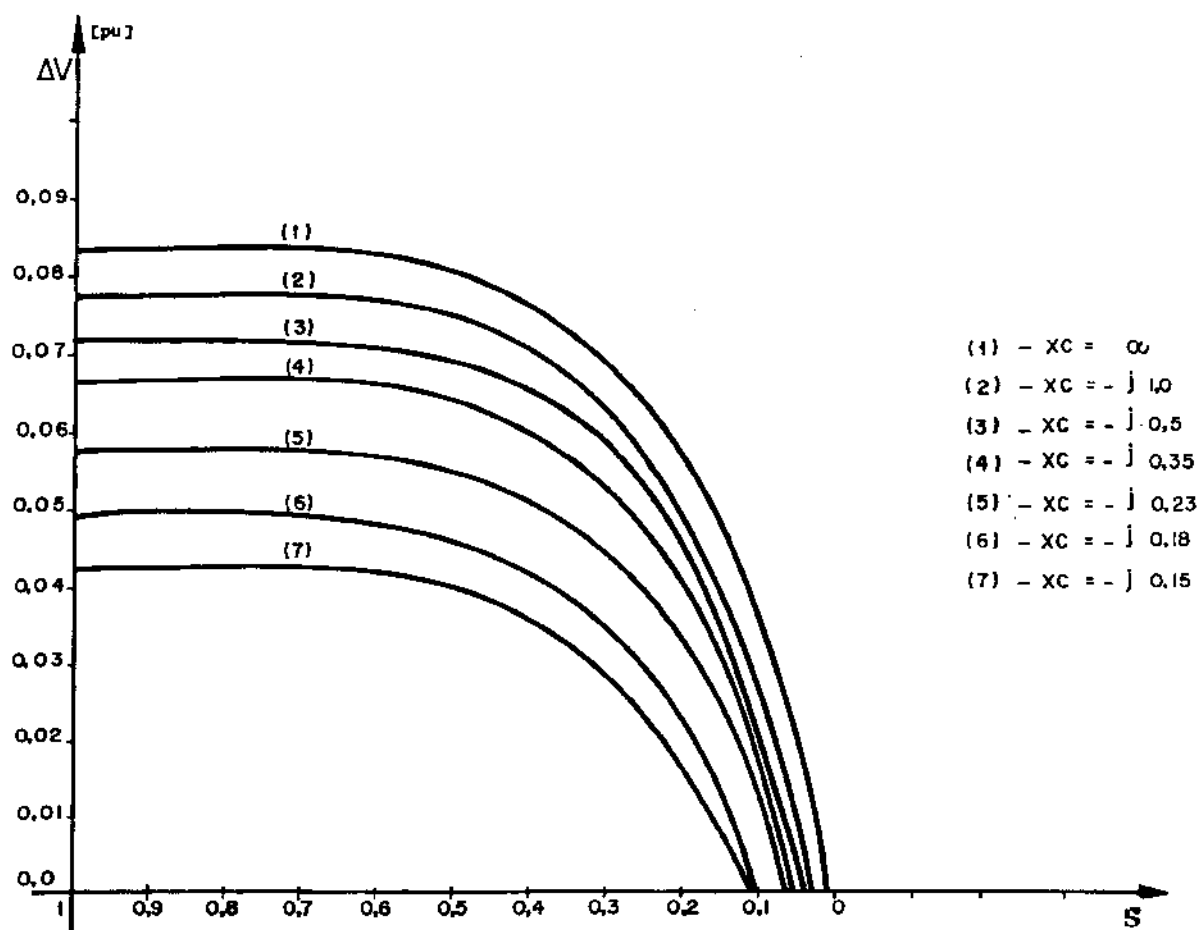


Figura 3.9. Curvas ΔV x s obtidas da Tabela 3.3

3.2.3 - Determinação do(s) capacitor(es) para o acionamento

As análises precedentes culminaram com uma representação gráfica bastante ilustrativa do comportamento da queda de tensão à medida que o escorregamento varia, para diferentes valores de capacitores expressos em valores por unidade. Tendo-se em vista as dificuldades encontradas para a obtenção de relações analíticas diretas que forneçam expressões explícitas para o cálculo dos capacitores, optou-se pelo uso dos gráficos para as especificações conforme é relatado a seguir. Antes porém, de se entrar no mérito do procedimento, é conveniente ressaltar que o gráfico ilustrado na figura 3.9 é representativo de um exemplo específico, sendo que para outros casos, figuras semelhantes devem ser obtidas.

A idéia básica consiste em se utilizar, quando da consideração de um banco de capacitores fixos, uma das curvas $\Delta V\% = f(s)$ associada a um nível aceitável de flutuação de tensão durante a partida que, uma vez atingido o regime permanente, não cause uma elevação da tensão nos terminais do motor. Esta última afirmativa significa, em outras palavras, que o capacitor que continuaria em operação seria também responsável pelo suprimento de uma parte dos reativos exigidos pelo motor em funcionamento normal, ou, pela correção do fator de potência sem que haja excesso de reativos gerados. A título de exemplo, utilizando-se da figura 3.9 verifica-se que a escolha de um capacitor de $-j0,5$ (pu) - para o motor utilizado na partida ($S = 1$), a tensão seria reduzida de 8,3% para aproximadamente 7,2%. Este mesmo capacitor, no regime permanente é responsável por uma regulação aproximadamente nula. Estes resultados indicam que houve uma redução bastante pequena na queda de tensão inicial, o que não constitui em nenhum atrativo para o valor escolhido de capacitor. Desta forma, uma extensão natural do estudo seria de se considerar um capacitor de maior porte, tal como, por exemplo, aquele associado à característica 7 (capacitor de $-j0,15$

pu). Sem dúvida, caso este capacitor fosse empregado, a queda de tensão inicial seria substancialmente reduzida (de 8,3% para 4,2%). Todavia, se o regime permanente é considerado, então uma sobre-elevação de tensão terminal inadmissível iria ocorrer.

Estes fatos levam à conclusão que o processo de partida sob análise somente seria exequível caso se empregasse o chaveamento de algumas unidades do banco inicial de capacitores. A situação é ilustrada pela figura 3.10, a qual mostra, de um modo mais genérico um conjunto de curvas semelhantes àsquelas da figura 3.9, entre tanto, acrescentando-se uma faixa limite para as variações de tensão a serem aceitas durante o processo de partida até a obtenção do regime nominal de funcionamento.

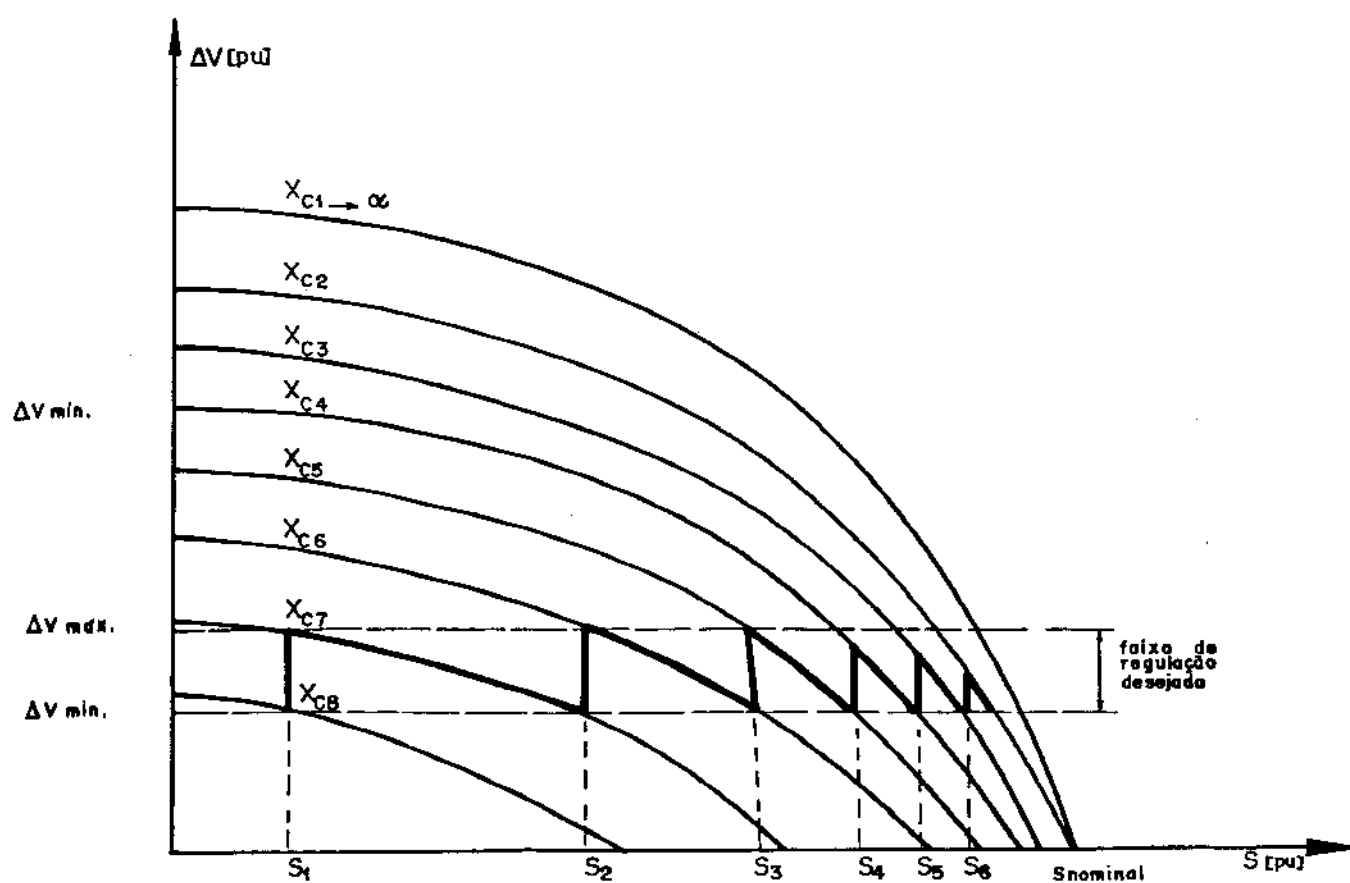


Figura 3.10. Processo de chaveamento de banco de capacitor durante a partida

Definindo-se os valores máximos e mínimos para as quedas de tensão a serem aceitas, tem-se da figura 3.10, que iniciando-se o processo com um capacitor X_{C9} , de $1 > S > S_1$, estes limites seriam respeitados. Em $S = S_1$, que também está implicitamente associado a um tempo $t = t_1$, uma parte do conjunto de capacitores seria chaveado, de modo que uma parte correspondente a X_{C8} restaria em operação. Procedendo desta forma para os diversos pontos ilustrados definem-se os vários estágios de chaveamento e os correspondentes pontos no tempo em que as aberturas das unidades deverão acontecer.

3.3 - Considerações Gerais

O método de partida com utilização de capacitor, aplicado a motor de indução, elimina o inconveniente da redução do torque durante o período de partida, devido ao fornecimento de reativo e sustentação da tensão nos terminais do motor, com isto reduz-se a influência sobre o sistema de alimentação.

Para a determinação da quantidade de reativo a serem fornecido ao motor durante o período de partida, montou-se curvas de flutuação, ocorrida na linha de alimentação, em função do escorregamento para cada capacitor. Através destas curvas será possível visualizar o melhor processo de se controlar o fornecimento de reativo solicitado pelo motor da rede de alimentação durante o período de partida, fazendo com que não ocorra perbuções sobre o sistema elétrico, bem como um bom comportamento das características operacionais do motor.

CAPÍTULO IV

FORMAS PARA A OBTENÇÃO DE REATIVOS VARIÁVEIS ATRAVÉS DE BANCOS DE CAPACITORES

4.1 - Introdução

Para o chaveamento de banco de capacitores, é de uso geral a utilização de disjuntores, que normalmente apresentam transitórios devido velocidade de chaveamento que está relacionado com sua estrutura eletromagnética. Estes transitórios no instante do chaveamento causam perturbações no sistema de alimentação prejudicando outras cargas.

Com o desenvolvimento da eletrônica de potência surgiu a opção de utilizar tiristores para o chaveamento de bancos de capacitores, com as vantagens de velocidade de operação no chaveamento, bem como a tendência de eliminação do transitório, chaveamento o tiristor no instante em que a corrente passe por um zero natural.

O fornecimento de reativos através da utilização de um capacitor fixo com reator controlado a tiristores, elimina por completo o problema do transitório, porém provoca a geração de harmônicos que são injetado no sistema.

4.2 - Chaveamento do Banco de Capacitores através de Disjuntores

4.2.1 - *Chaveamento de uma unidade capacitiva*

A figura 4.1 apresenta o arranjo físico correspondente ao chaveamento de capacitores através de disjuntores.

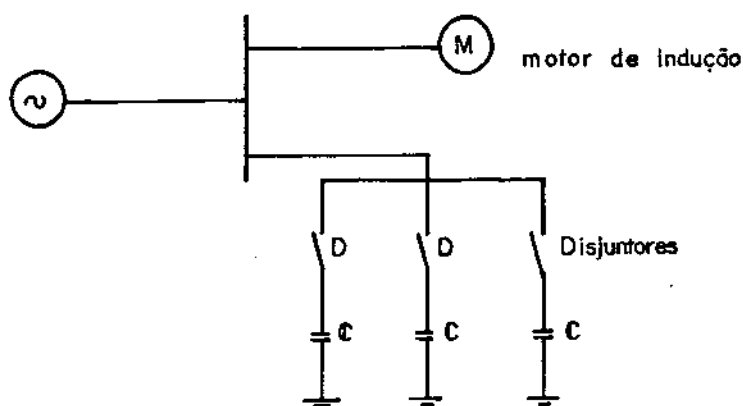


Figura 4.1 - Chaveamento de banco de capacitores por disjunctores.

Quando um capacitor é conectado a uma fonte de tensão de corrente alternada, uma corrente transitória de carga é estabelecida, a qual apresenta como principais características uma elevada magnitude e curta-duração. A parcela mais importante desta corrente transitória de alta frequência ocorre e encerra usualmente em uma pequena fração do ciclo da frequência fundamental. A magnitude atingida por este transitório é maior se a tensão da fonte passa pelo seu valor de pico quando o chaveamento é processado.

Na figura 4.2 tem-se o circuito equivalente monofásico, para o estudo do fenômeno da energização de um banco de capacitores. De acordo com [9], a fonte alternada, dentro do período de interesse, é substituída por uma fonte contínua. Onde o conjunto disjuntor capacitor pode ser analisado como um circuito R.L.C.

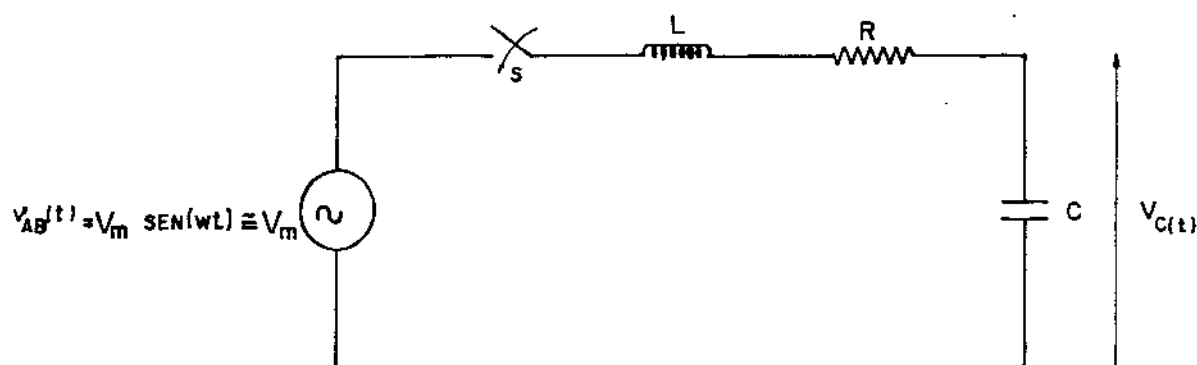


Figura 4.2 - Circuito equivalente para o estudo do chaveamento de capacitores.

Como é conhecido, se a resistência R for nula, a corrente transitória, teria uma forma de onda senoidal de alta frequência, conforme indica a figura 4.3. Pode-se facilmente mostrar que a corrente $i(t)$ será dada por:

$$i(t) = \frac{V_m}{L/C} \sin \frac{T}{L C} = I_m \sin(\omega_o t)$$

onde:

I_m = valor de pico de corrente transitório

ω_o = freqüência angular de oscilação.

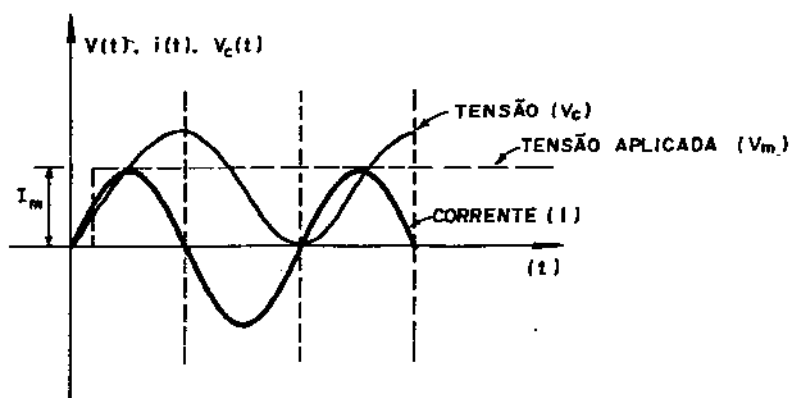


Figura 4.3 - Análise do chaveamento do banco de capacitor desprezando a resistência R , da figura 4.2.

A presença da resistência R causa um amortecimento conforme indicado na figura 4.4. Observa-se que a tensão do capacitor aproxima-se da tensão aplicada V_m de forma oscilatória. Para a determinação do primeiro valor de pico da corrente, a resistência é usualmente desprezada, e, o valor máximo assim obtido para $i(t)$ é calculado com um pequeno erro, porém de uma forma simples.

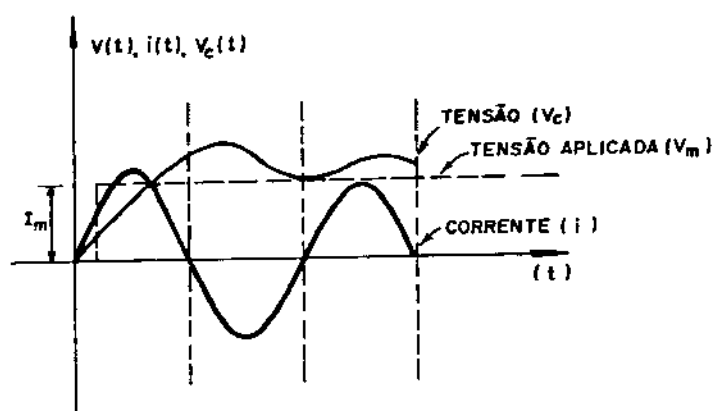


Figura 4.4 - Análise do chaveamento do banco de capacitor considerando a resistência R da figura 4.2.

Considerando que para os instantes iniciais a resistência pouco afeta os resultados, então, tanto para o caso com $R = 0$ ou $R \neq 0$ tem-se:

$$I_m = \frac{V_m}{L/C}$$

4.2.2 - Chaveamento de Capacitores em paralelo

Quando um capacitor já se encontra energizado e um segundo capacitor é chaveado, dois transitórios distintos ocorrem. O primeiro transitório envolve a fonte e o capacitor chaveado e o segundo envolve o(s) capacitor(es) que se encontrava(m) energizado(s) e aquele que está sendo chaveado. A situação física correspondente a este caso é ilustrado na figura 4.5.

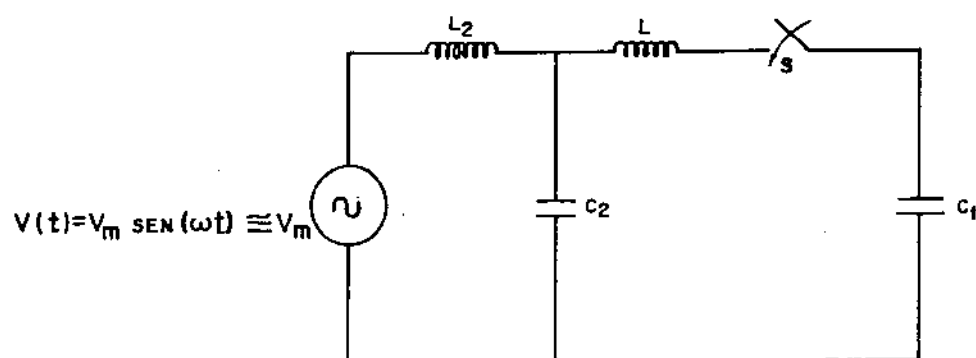


Figura 4.5 - Chaveamento de capacitores em paralelo

Na figura 4.5.:

V_m = tensão de pico da fonte

L_2 = indutância indutiva da fonte

C_2 = capacitor já energizado

C_1 = capacitor a ser chaveado

Usualmente a indutância L é bastante pequena comparada ao valor de L_2 e uma corrente energizadora de alta frequência se estabelece entre C_2 e C_1 .

Posteriormente, o fenômeno é seguido por uma corrente transitória menor e de frequência mais baixa, que é o resultado da interação entre a fonte e o banco completo ($C_1 + C_2$). Este último fenômeno é de importância secundária e pode normalmente ser ignorado. Após tais considerações o fenômeno pode ser tratado através do circuito da figura 4.6.

Na figura 4.6 admite-se que a tensão do capacitor já energizado é igual à da fonte, ou seja, despreza-se a queda de tensão entre a fonte e o capacitor C_2 , quando a chave S se encontrava aberta.

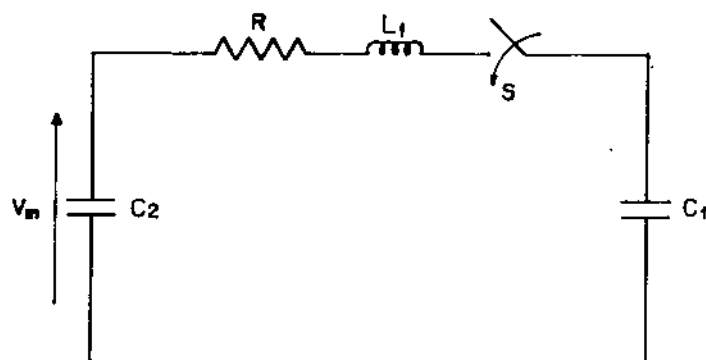


Figura 4.6 - Circuito Simplificado do Chaveamento de Capacitores em paralelo

Os dois valores de capacitores podem ser combinados conforme a figura 4.7.

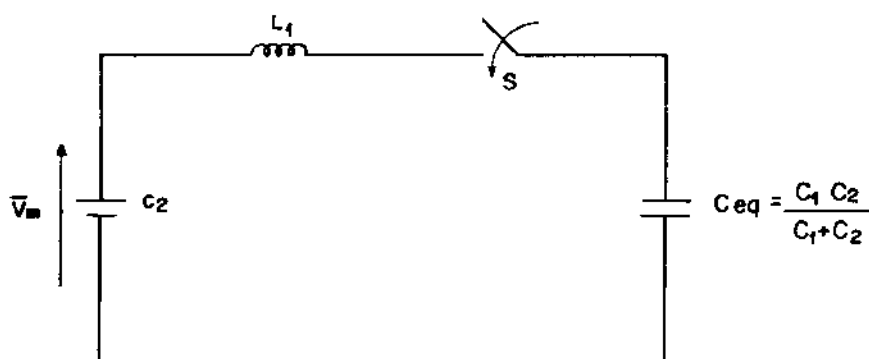


Figura 4.7 - Circuito equivalente do Chaveamento de capacitores em paralelo

O circuito da figura 4.7 é semelhante àquele da figura 4.1., forma que o valor aproximado do pico de corrente transitórios pode ser calculado através da equação (4.4):

$$I_m = \frac{1}{\sqrt{LC_{eq}}} \quad (4.4)$$

A frequência da corrente transitória pode ser calculada pela equação (4.5):

$$f_o = \frac{1}{\sqrt{L/C_{eq}}}$$

4.2.3 - Desligamento de bancos de capacitores

Quando um banco de capacitor é desconectado, podem ocorrer transitórios, os quais em muitos casos são mais drásticos que os de energização, conforme ilustra a figura 4.8 e 4.9.

Devido a diferença do ângulo de fase entre a corrente e a tensão ser (90°) , o capacitor encontra-se carregado com a tensão máxima, igual a tensão de pico da fonte, quando o capacitor é desconectado. O capacitor, agora isolado da fonte mantém a carga, mantendo portanto nos seus terminais um potencial V_m . Meio ciclo após o capacitor ser desconectado da fonte, a figura 4.9 ilustra, que devido ao potencial gerado pela carga armazenada pelo capacitor e o posicionamento da onda de tensão da fonte de alimentação, a diferença de potencial entre os contatos da chave atinge um valor de $2V_m$, valor este potencialmente perigoso.

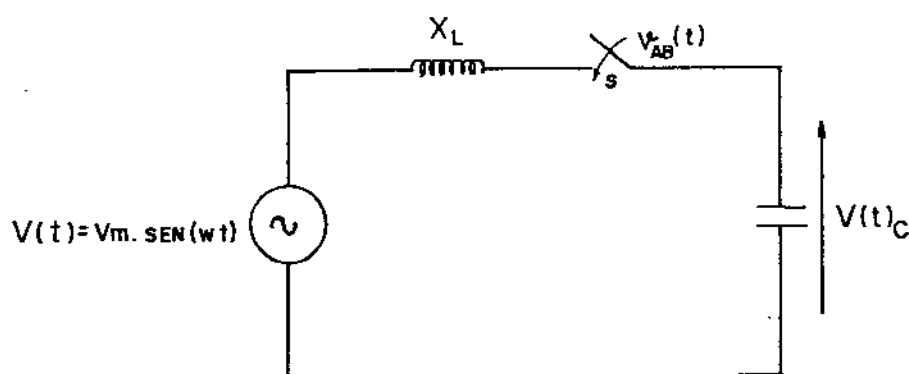


Figura 4.8 - Desligamento de bancos de capacitores

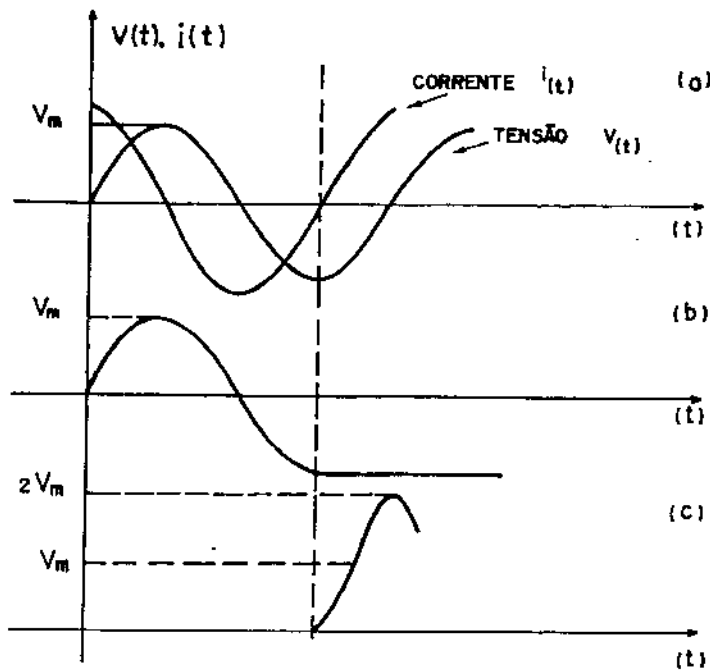


Figura 4.9 - Verificação da operação de desconectar o capacitor.

- a) Posicionamento da tensão e corrente de alimentação no instante em que o banco é desconectado.
- b) Tensão no capacitor após este ser desconectado.
- c) Tensão nos terminais da chave após meio ciclo.

4.3 - Capacitor Chaveado a Tiristor

Uma outra solução para o chaveamento de capacitores é através do emprego de tiristores em ligação antiparalelo conforme mostra a figura 4.10. O capacitor será ligado em série com o reator para eliminar risco de ressonância harmônica 10, 12, e reduzir qualquer possibilidade de picos transitórios de corrente.

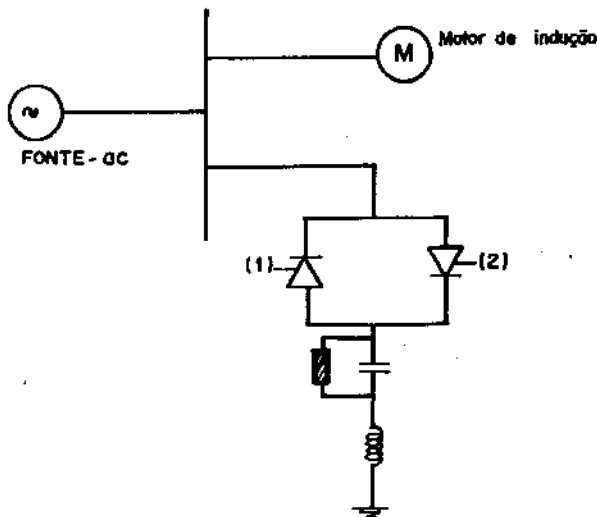


Figura 4.10 - Chaveamento do capacitor por tiristor.

Por questão operativos, quando o capacitor não está conectado, ele é mantido carregado pelo positivo ou negativo do valor de pico da onda de tensão. Desde que os capacitores são providos de resistores para descarga, o capacitor poderia vagarosamente esta tensão. Para manter a tensão do capacitor, um curto pulso de gatilho é injetado no tiristor, que passa a conduzir corrente, quando a tensão do circuito fica igual a tensão do capacitor.

4.4 - Reator Controlado a Tiristor

Para se fornecer potencia reativa variável através do chaveamento de reatores pode-se utilizar o esquema da figura (4.11).

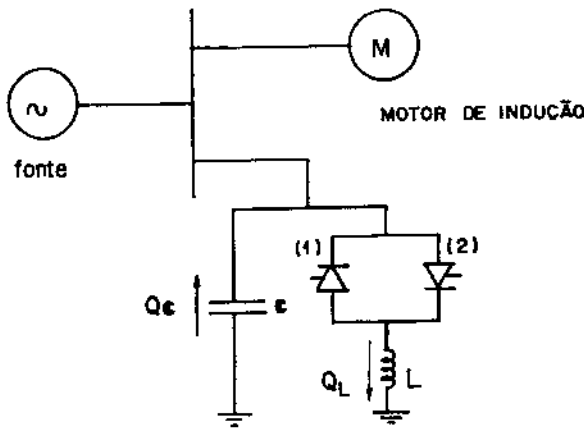


Figura 4.11 - Reator Controlado a tiristor

Uma análise do funcionamento do circuito da figura 4.11, leva as formas de onda, representada na figura 4.12.

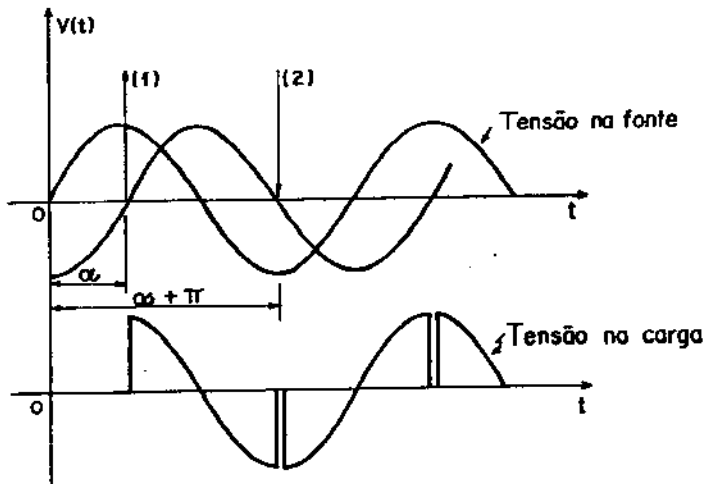


Figura 4.12 - Formas de onda do reator controlado

Com a variação de α entre 90° a 180° , a correspondente potência reativa absorvida pelo reator pode ser continuamente alterada de seu valor nominal ate zero. É esta característica, em combinação com capacitor fino que proporciona ao equipamento uma alteração contínua de comportamento preponderantemente capacitivo, de acordo com a solicitação da carga.

Com este tipo de acionamento pode-se efetivamente compensar as oscilações de tensão para arranjos trifásicos, em tempos bastante curtos. Além disto, tem-se a possibilidade de um controle independente por fase, que é possível porque o reator controlado a tiristor proporciona a compensação de desequilíbrio normalmente em contrados. A figura 4.13 ilustra uma conexão típica para compensadores trifásicos.

Os problemas relativos a este tipo de equipamento são os harmônicos produzidos no chaveamento. Este assunto e sucintamente considerado a seguir.

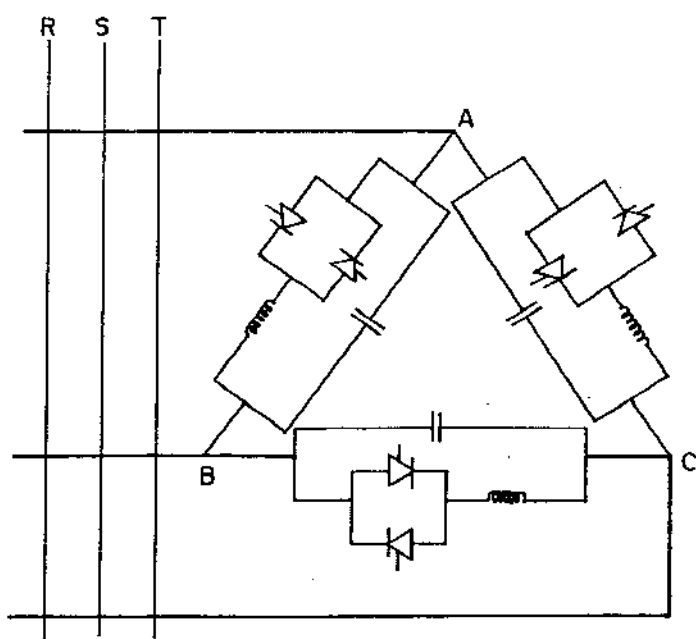


Figura 4.13 - Compensador estático tipo RCT (reator controlado a tiristor) - trifásico.

Do circuito da figura 4.11 ou 4.13, constata-se que as correntes capacitivas de linha, são senoidais, com valor eficaz igual a:

$$I_{(c)} = \frac{Q_c}{V}$$

onde:

V - módulo da tensão eficaz fase-neutra

Q_c - potência reativa, por fase, do banco de capacitor.

Considerando o reator controlado a tiristor representado por uma resistência e uma indutância, tem-se o circuito equivalente da figura 4.14.

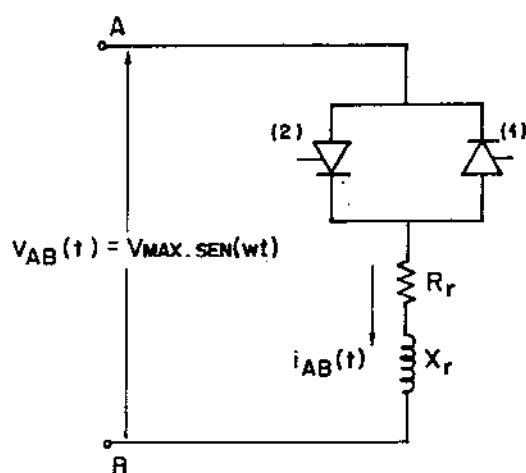


Figura 4.14 - Circuito representativo de um dos ramos do delta da conexão de um reator controlado por tiristor considerando a resistência.

Um tratamento matemático, considerando $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ conduz as formas de onda para as correntes de fase para o reator, conforme indicadas nas figuras 4.15 e 4.16, associadas respectivamente a $R \neq 0$ e $R = 0$.

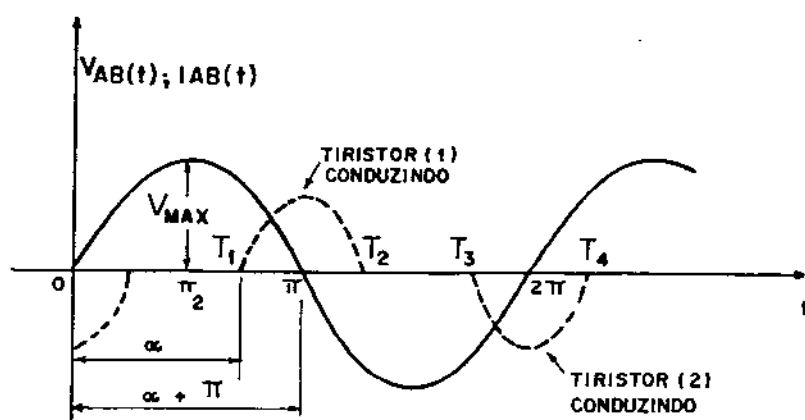


Figura 4.15 - Forma de onda de corrente de fase do reator para α genérico considerando $R = 0$.

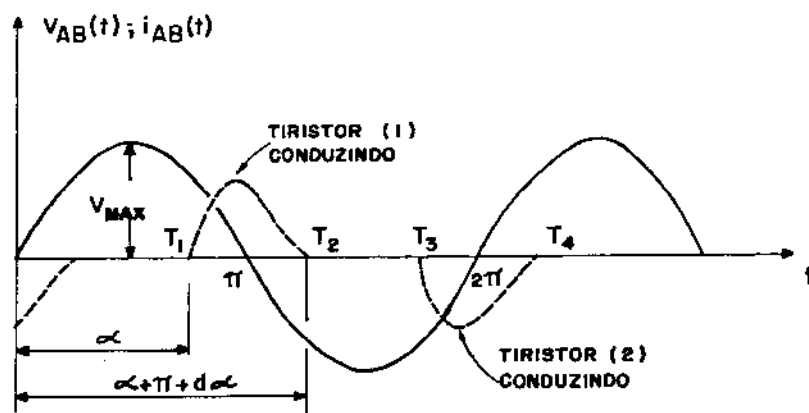


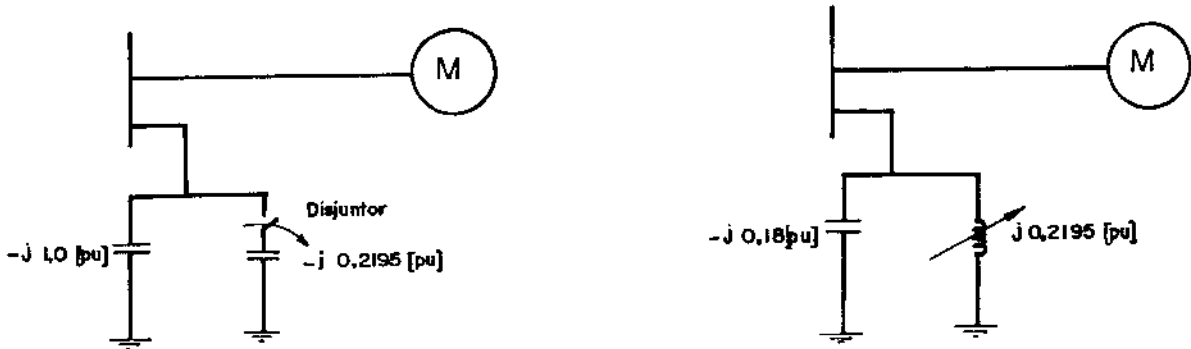
Figura 4.16 - Forma de onda de corrente de fase do reator para α genérica considerando $R \neq 0$.

4.5 - Especificação do reator e capacitor do RCT (reator controlado a tiristor)

4.5.1 - *Especificação do capacitor*

As exigências impostas para que os efeitos da partida dos motores não prejudiquem a qualidade de suprimento de energia elétrica requerem que sejam estipulados valores máximos para as quedas de tensão ($\Delta V_{\text{máx}}$), nos barramentos de alimentação dos motores. Um valor tipicamente aceito é de 5% e utilizando este valor para o caso numérico que vem sendo utilizado ao longo do trabalho, tem-se

que, com base na figura 3.9, um banco de capacitor de $-j 0,18$ pu atenderia este requisito. Se o motor considerado deve, no regime permanente, apresentar uma queda de tensão de 2%, da mesma figura obtem-se que a capacitância necessária será aproximadamente $-j 1,0$ pu. Estes resultados levam a concluir que uma parcela de $-j 0,2195$ pu de capacitores deve ser retirada de operação. Uma outra forma de se chegar ao mesmo valor de reatância capacitiva, para atender as condições de regime permanente, seria a de se conectar em paralelo com o banco de capacitores original uma reatância indutiva de valor igual ao da parcela capacitiva que deveria ser retirada da operação. As figuras 4.17 (a) e (b) ilustram fisicamente, os dois procedimentos.



(a) Chaveamento de capacitores

(b) inserção de reatores em paralelo

Figura 4.17 - Obtenção de uma reatância capacitiva equivalente de $-j 1,0$ pu para atender a operação em regime permanente.

Na figura 4.17 deve-se considerar que estando o motor na condição de partida, para o caso (a), a capacitância total conectada ao barramento é de:

$$\frac{(-j 1,0) (-j 0,2195)}{(-j 1,0 - j 0,2195)} = j 0,18 \text{ pu}$$

Para o caso (b), supondo que na partida $X_L \rightarrow \infty$ (o que equivale a $\alpha = 180^\circ$), então um valor de reatância capacitor $-j 0,18$ pu restaria em operação.

Para o regime permanente, conforme referido anteriormente, a solução proposta pela figura 4.17 (a) seria a de desconectar o banco de capacitor de $-j 0,2195$ pu. Com isto permaneceria em operação apenas o banco $-j 1,0$ pu, responsável pela queda de tensão de 1% em regime permanente. Com relação a proposição da figura 4.17 (b), a inserção paralela de um reator de $j 0,2195$ pu com o capacitor de $-j 0,18$ pu resultaria em:

$$\frac{(-j 0,18) (+j 0,2195)}{(-j 0,18 + j 0,2195)} = -j 1,0 \text{ pu}$$

Desta forma conclui-se que o reator a ser colocado deve variar desde um circuito aberto até o valor $j 0,2195$ pu, para base do motor. Assim, a utilização de um reator deste valor ($j 0,2195$ pu) controlado entre $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ permitiria a obtenção da faixa de ajuste desejada.

Embora o procedimento a que apresentado tenha sido desenvolvido para um caso específico, a idéia é geral e pode, sem dificuldades, ser estendida a outras situações.

4.6 - Considerações Gerais

Verificou-se anteriormente que durante o período de partida do motor de indução existe uma solicitação de uma corrente altamente reativa. Para tentar reduzir o efeito desta corrente sobre o sistema de alimentação, foram propostas formas para fornecer este reativo através da utilização de bancos de capacitores.

Dos três processos estudados o utilizado no trabalho será o reator controlado a tiristor (RCT), que através de um capacitor fino e reator variável através de tiristores, fornecerá reativo variável.

vel desde o instante da partida, até a posição de regime permanente, evitando desta forma a ocorrência de transitórios no sistema de alimentação, bem como melhorando a própria operação do motor.

CAPÍTULO V

DIMENSIONAMENTO BÁSICO DOS PARÂMETROS DO COMPEN- SADOR DE REATIVOS, E SUA OPERAÇÃO

5.1 - Introdução

O dispositivo para suprimento variável de reativos escolhido emprega a combinação paralela de um capacitor fino e um reator controlado a tiristores. Para o dimensionamento dos parâmetros principais deste compensador deve-se seguir o procedimento estabelecido a seguir:

- (i) Calcular os parâmetros do circuito equivalente do motor, conforme exposto no apêndice I.
- (ii) Dimensionar, com base nos parâmetros acima, o banco de capacitores.
- (iii) Dimensionar o banco de reatores
- (iv) Utilizando o sistema tiristorizado para chaveamento, definir a estrutura de projeto do sistema de disparo.

Estes aspectos são discutidos em detalhes nos desenvolvimentos a seguir.

5.2 - Determinação do capacitor

A especificação do capacitor é realizada no capítulo III.

5.3 - Determinação do Reator

O valor de indutância (L) é especificado no capítulo IV, para um ou vários reatores a serem chaveados.

5.3.1 - Indutância

$$L = (4\pi^2 r^2 N^2) / (\ell K_n 10^{-9})$$

onde:

L = indutância em [Henries]

r = raio do núcleo em [cm]

ℓ = comprimento da bobina em [cm]

K_n = constante que depende das dimensões do núcleo

5.3.2 - Número de espiras da bobina:

$$N = \sqrt{(L\ell) / (4\pi^2 r^2 K_n 10^{-9})}$$

5.3.3 - Constante K_n :

$$K_n = \ell / [\ell + 0,9 (r/\ell) - 0,02 (r/\ell)^2]$$

5.3.4 - Todos de r :

Depende das dimensões do carretel a ser utilizado.

5.4 - Circuito de controle dos tiristores

A configuração do circuito gerador de pulsos para controle dos tiristores a serem conectados em anti-paralelo se apresenta conforme a figura 5.1.

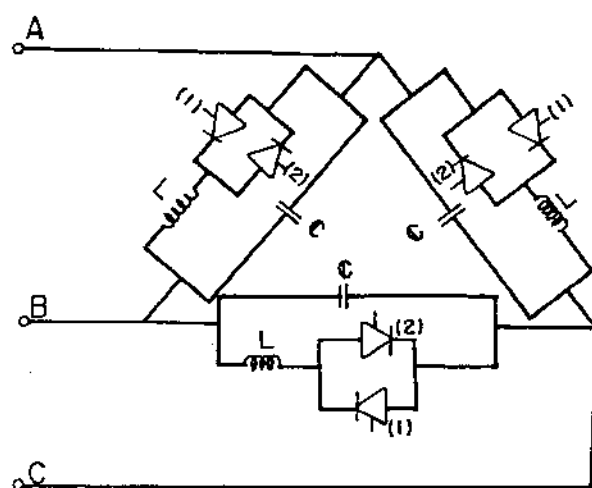


Figura 5.1 - Configuração do banco de capacitor controlado pelo reator chaveado a tiristor.

O controle dos pulsos dos tiristores será executado pelo circuito representado na figura 5.2, sendo que os sinais em cada etapa do circuito estão descritos na figura 5.3.

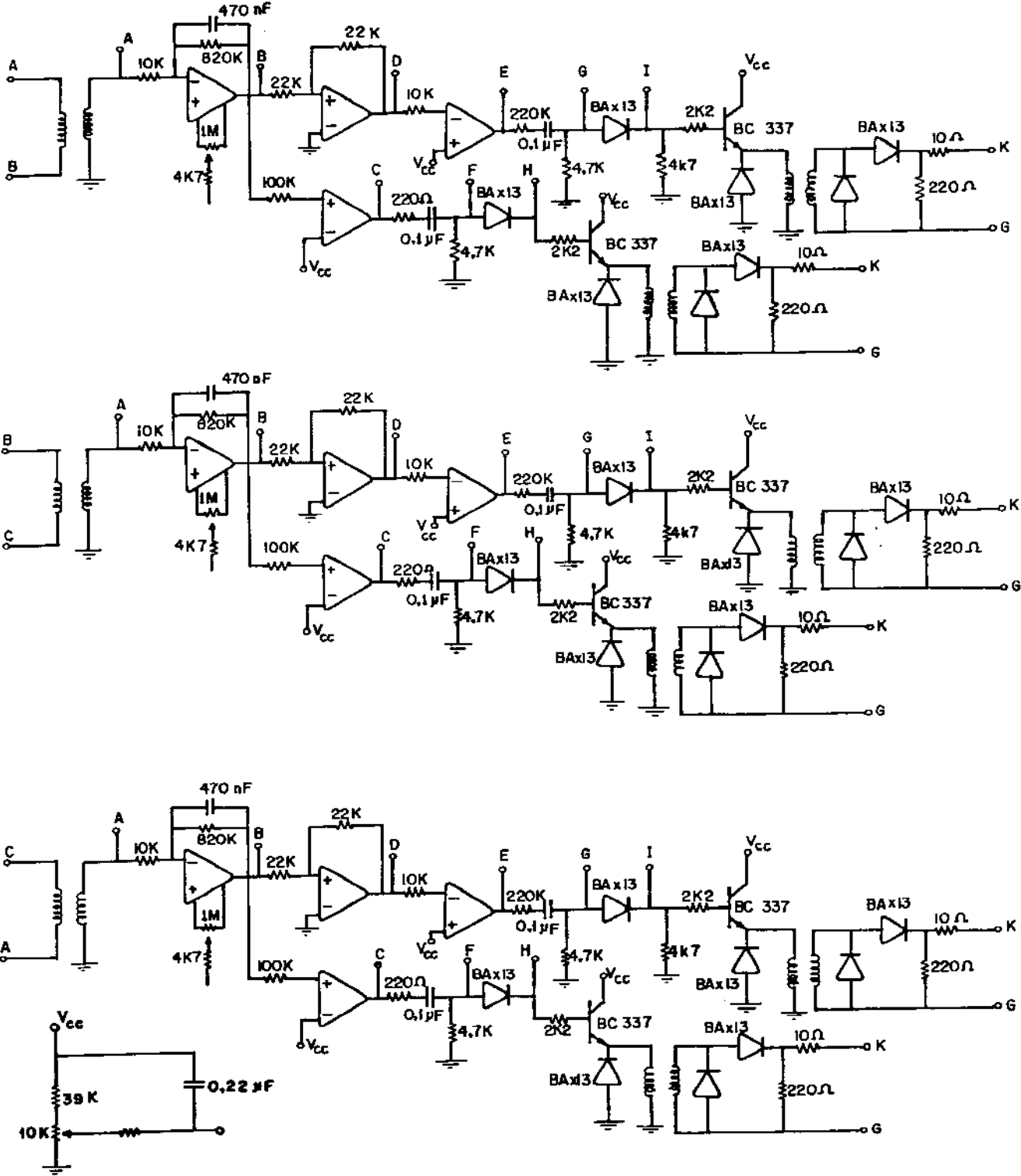


Figura 5.2 - Controlador de pulso dos tiristores em anti-pa
ralelo.

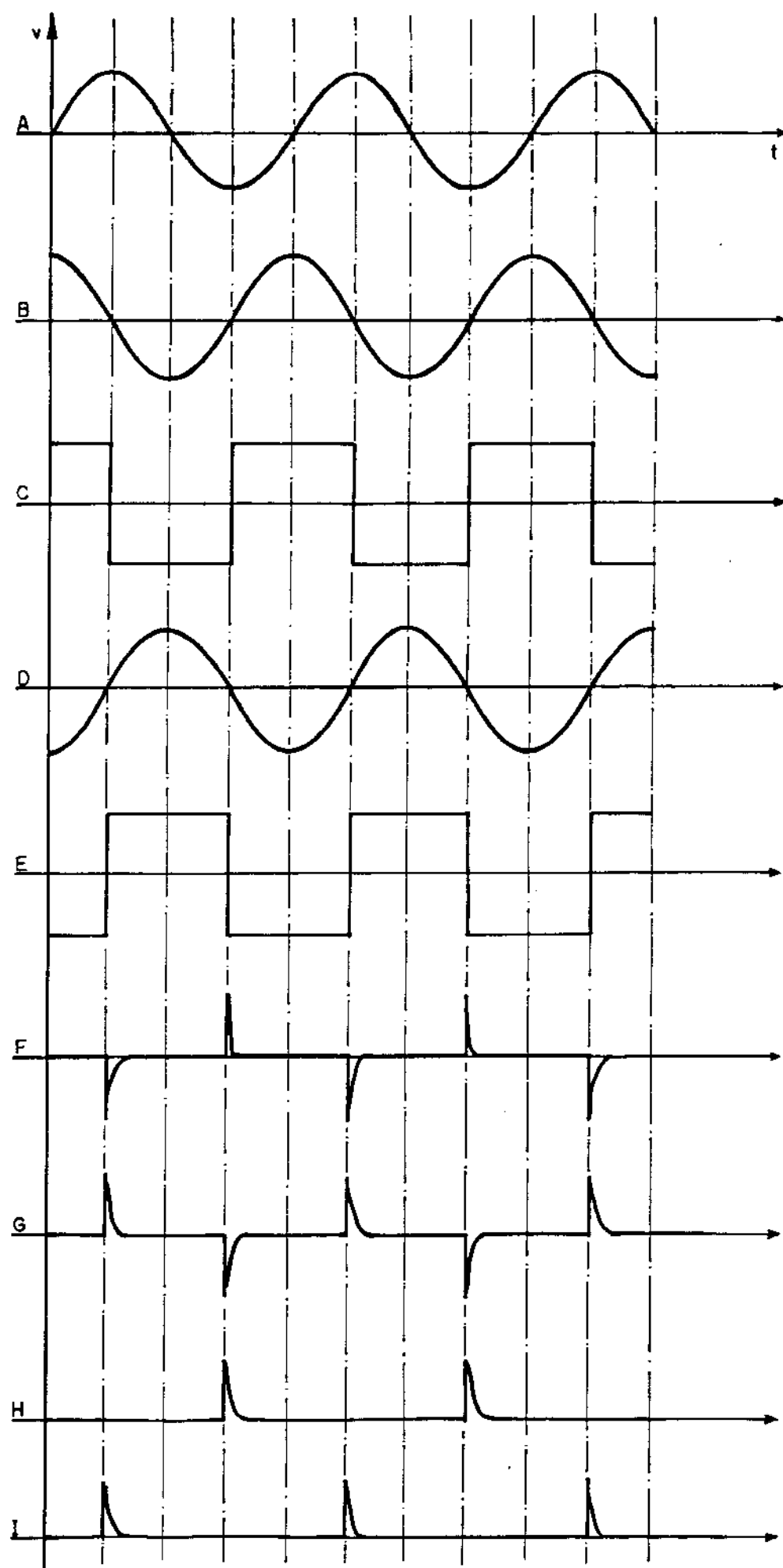


Figura 5.3 - Obtenção da configuração de sinais em cada ponto do circuito de controle.

A obtenção do controle de α de 90° a 180° é feita através do controle do V_{CC} dos comparadores através de um potenciômetro ligado a uma fonte simétrica de ± 15 Volts, sendo este controle executado de forma manual.

5.5 - Resultados experimentais

Com o objetivo de comprovar a metodologia desenvolvida, foram realizados diversos testes experimentais cujos resultados mais expressivos são discutidos a seguir.

Inicialmente, é conveniente destacar que o arranjo físico empregado é do tipo ilustrado na figura 5.4.

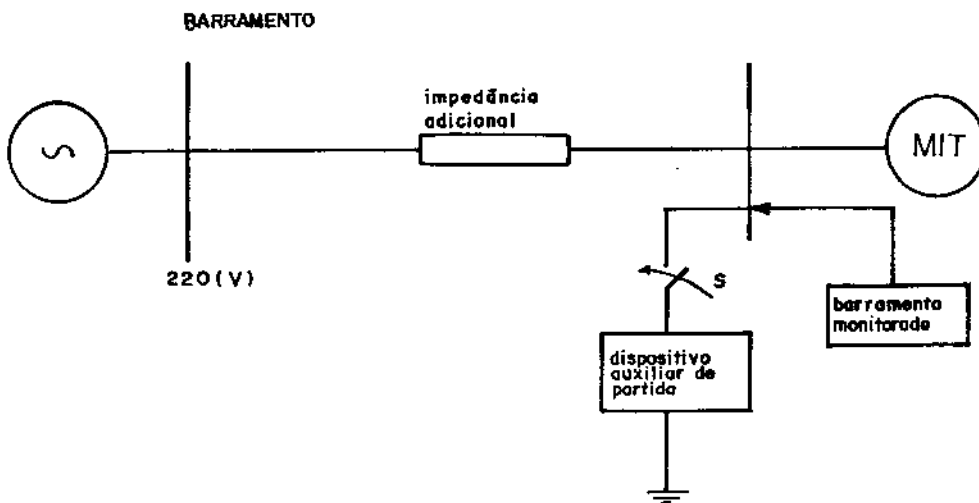


Figura 5.4 - Arranjo utilizado na verificação experimental

Quanto às características dos elementos empregados, têm-se:

(a) impedância adicional

Foram utilizados três reatores (um por fase) inseridos entre o barramento e o motor, apresentando:

$$L = 1,2639 \text{ mH}$$

$$R = 3,77 \text{ } \Omega$$

Correspondendo a uma impedância $Z_a = 3,8 \text{ } \Omega$ à 60 Hz.

(b) Motor

O motor usado foi do tipo indução, trifásico, gaiola, com as seguintes características:

1,5 CV, 220V, 60 Hz, 1730 rpm, isolação tipo A.

(c) Monitorização da tensão do barramento

Para tanto utilizou-se um osciloscópio de persistência, fabricação HP, com o qual foi possível oscilografar as tensões nos terminais do motor durante sua partida.

(d) Dispositivo auxiliar de partida

Conforme destacado nas seções precedentes, o dispositivo empregado baseia-se num arranjo paralelo formado por um banco de capacitores fixo em paralelo com um reator controlado por tiristores.

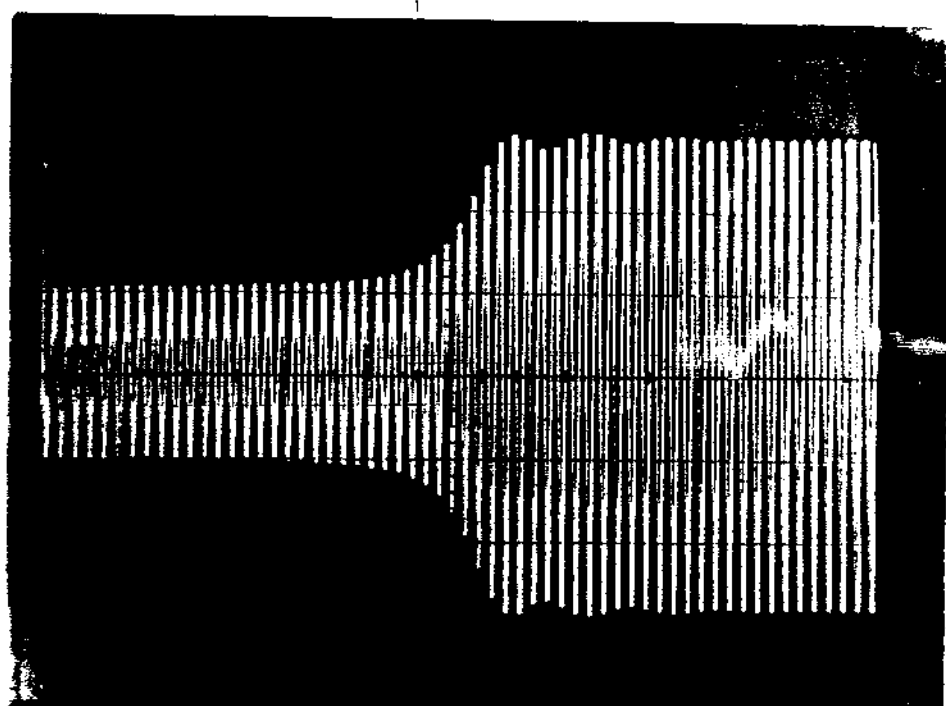
Características:

- banco de capacitor de $40\mu\text{F}/\text{fase}$, 220 [V], Δ
- reator de 165 mH/fase, 220 [V], Δ
- controle tiristorizado com $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$.

Dos resultados obtidos são discutidos os seguintes casos:

(a) Partida sem dispositivo auxiliar

Esta situação corresponde a partida com a chave S na condição aberta. O oscilograma 1 indica a tensão do barramento de alimentação do motor. Observa-se uma acentuada queda de tensão, com duração de aproximadamente 29 ciclos, quando a tensão se estabiliza no seu valor final. A escala utilizada para o registro foi de 5,3 V/cm, que foi mantida constante para todas as leituras. O motor encontrava-se na condição a vazio.

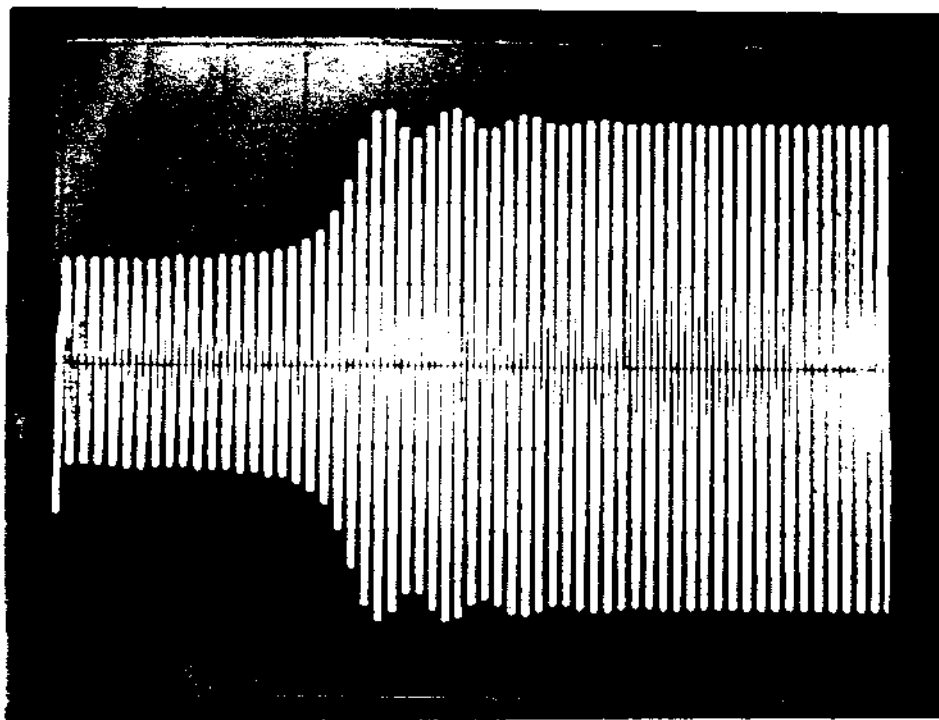


Oscilograma 1 - Partida sem dispositivo auxiliar-tensão do barramento do motor.

(b) Partida com banco de capacitor de $40\mu\text{F}$ /fase sem reator controlado.

A situação é idêntica à anterior, exceto pela conexão do banco de capacitores de $40\mu\text{F}$ /fase, sem qualquer forma de compensação ($\alpha = 180^\circ$). O oscilograma 2 ilustra a tensão do barramento do motor onde se observam alguns aspectos interessantes:

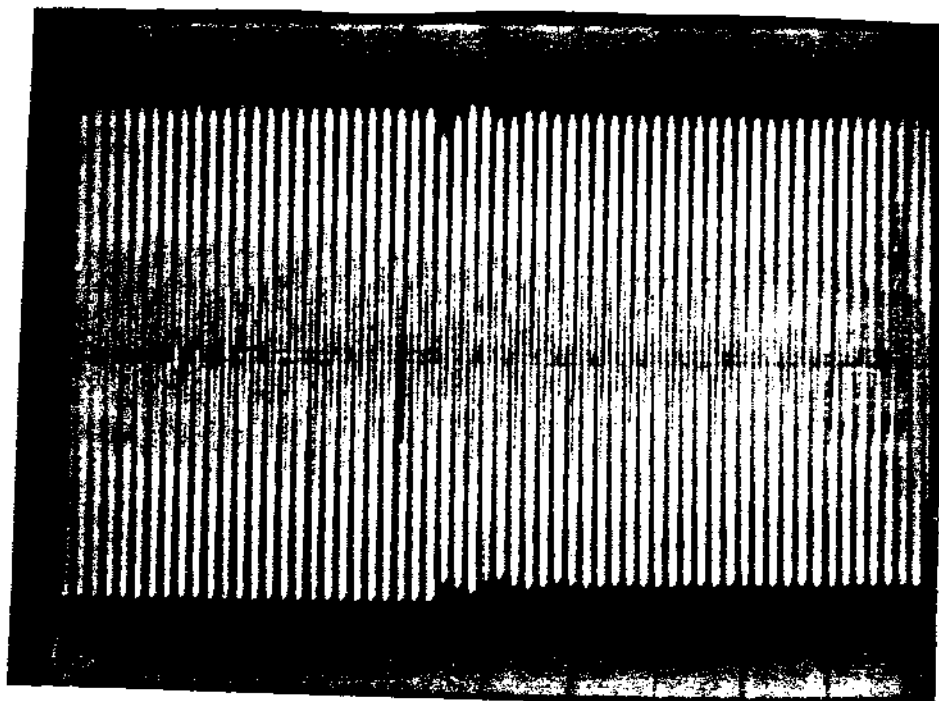
- A duração da partida é inferior à anterior. Isto é fácil de se compreender pois a sustentação maior da tensão aumenta os torques iniciais acelerando mais o processo da partida. Este fato já tinha sido observado anteriormente.
- Mesmo nos instantes iniciais, a tensão mostra valores mais elevados, o mesmo ocorrendo no regime permanente. Se comparado ao oscilograma 1 constata-se no regime permanente, uma sobre-elevação de tensão da ordem de 1,098%.



Oscilograma 2 - Partida com capacitor fixo, sem compensação indutiva tensão do barramento do motor.

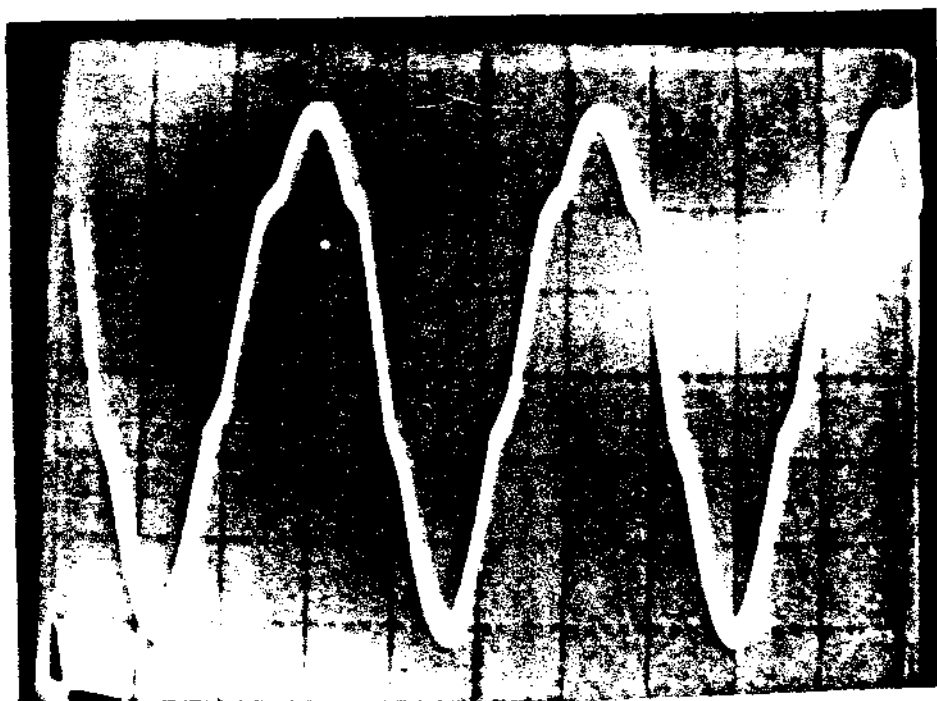
- (c) Partida com banco de capacitor de $40\mu\text{F}/\text{fase}$ seguido de controle indutivo.

A situação é idêntica à anterior exceto pela inclusão, após a estabilização, de uma indutância com controle por tiristores. O oscilograma 3 mostra a tensão estabilizada com $\alpha = 180^\circ$ e o efeito da variação deste para 130° . O resultado disto pode ser evidenciado na figura onde se observa uma redução da sobre-elevação da tensão visto que o efeito capacitivo líquido resultante fica diminuído.



Oscilograma 3 - Partida com capacitor fixo com compensação ' indutiva ($\alpha = 130^\circ$) - tensão do barramento ' do barramento do motor.

A corrente de linha correspondente no reator é ilustrada através do oscilograma 4, onde se constata o seu aspecto não-senoidal devido ao controle dos tiristores.



Oscilograma 4 - Corrente de linha do reator com $\alpha = 130^\circ$.

- (d) Partida com banco de capacitor de $70\mu\text{F}/\text{fase}$, sem controle indutivo.

Este caso está relacionado à utilização de um banco de capacitor sobredimensionado. Embora não tenha sido este o enfoque deste trabalho, o oscilograma 5 ilustra a existência de um fenômeno de oscilação de baixa frequência, provavelmente envolvendo o efeito da ferro-ressonância. Isto mostra a necessidade de uma análise criteriosa deste método tanto sob ponto de vista de regime permanente como também de seus aspectos transitórios.



Oscilograma 5 - Fenômeno de oscilação de baixa frequência

5.6 - Considerações Gerais

Pelos resultados obtidos com o levantamento feito em laboratório, verificou-se que é possível controlar o fornecimento de reativos desde a partida do motor até que este atinja o regime permanente, através do controle do ângulo de disparo do tiristor, de forma contínua.

Para aplicação deste tipo de acionamento, é importante o dimensionamento correto do banco de capacitor, pois uma elevada quantidade de reativos pode vir a causar perturbações na operação do motor, e uma falta de reativos, não elimina os efeitos da partida do motor, sobre o sistema de alimentação. Um outro aspecto é a sofisticação do controle, a utilização de um controle em malha fechada, apresentará um melhor rendimento em termos operacionais.

CAPÍTULO VI

MODELAGEM COMPUTACIONAL DA PARTIDA DE MOTORES DE IN- DUÇÃO ATRAVÉS DE SUPRIMENTO VARIÁVEL DE REATIVOS

6.1 - Introdução

Para simulação e estudo computacional da partida de motores e seu efeito sobre o sistema elétrico de potência, optou-se neste trabalho pelo uso de um programa digital de grande versatilidade e, de uso já comprovado através de várias teses e estudos industriais [3], [15], [16], [17], [18].

6.2 - Estrutura básica do programa utilizado e recursos de estudo disponíveis

O programa tem por meta fornecer a resposta dinâmica de um sistema elétrico de potência face a distúrbios associados a:

- chaveamento de linhas
- faltas
- perdas de geradores
- eliminação de carga

O princípio básico da resolução do problema é o processo normal passo a passo, tomando como ponto de partida uma condição equilibrada de operação do sistema. O processo numérico usado envolve modernas técnicas computacionais, de tal forma que, grandes sistemas elétricos podem ser eficientemente estudados.

Quanto às representações de componentes destaca-se que os geradores podem ser estudados por quatro modelos que diferem pela complexidade de sua estrutura. Reguladoras de velocidade e tensão são incorporados de modo a compreender os diferentes tipos existentes. Linhas, transformadores e cargas são modeladas segundo as

técnicas mais completas atualmente disponíveis. As cargas podem ser modeladas por:

- impedância constante
- corrente constante
- potência constante

Quanto à representação dinâmica do motor de indução utilizada no programa são empregados basicamente dois modelos:

- a gaiola simples
- a gaiola dupla.

As bases analíticas para simulação digital destes dois motores são discutidas a seguir.

6.3 - Modelo do motor de indução de gaiola simples.

6.3.1 - *Circuito equivalente em regime permanente*

O motor de indução pode neste caso, ser representado por um circuito equivalente mostrado na figura 6.1.

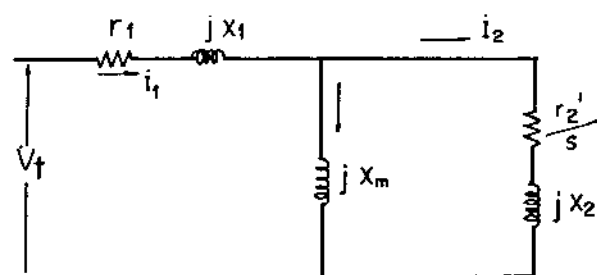


Figura 6.1 - Circuito equivalente em estado permanente do motor de indução gaiola simples.

Embora o circuito da figura 6.1 seja apropriado para estudos em regime permanente, o seu uso para transitórios eletromagnéticos não é apropriado. De acordo com [18], deve-se incluir no modelo

os transitórios elétricos e mecânicos, conforme descreve-se a seguir. Esta inclusão será feita em duas etapas inicialmente incorporando-se apenas o transitório mecânico e posteriormente, o elétrico.

6.3.2 - Inclusão do transitório mecânico no modelo do motor

A inclusão do transitório mecânico é feita através do emprego do circuito equivalente da figura 6.1, considerando o escorregamento variável e calculando através da equação (6.1).

$$\frac{ds}{dt} = \frac{L}{2H} (T_e - T_m) \quad (6.1)$$

onde:

H = constante de inércia da máquina

T_e = torque elétricos

T_m = torque mecânico

Neste caso o transitório elétrico é ignorado, o que equivale a desconsiderar as constantes de tempo do rotor e estator na análise do comportamento transitório.

6.3.3 - Inclusão dos transitórios elétricos e mecânicos no rotor.

Uma das propostas do circuito equivalente do motor de indução para análise transitória é mostrada na figura 6.2.

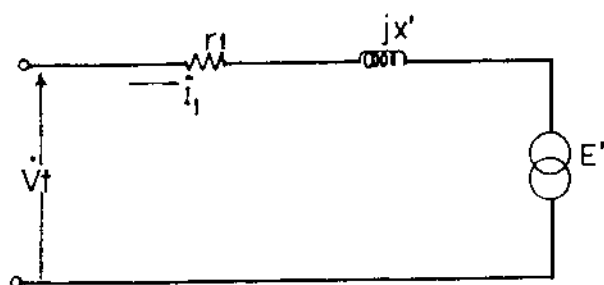


Figura 6.2 - Circuito equivalente para representação do comportamento transitório do motor de indução incluindo o transitório do rotor.

Utilizando as equações obtidas em [7] e [18], juntamente com equação de movimento do rotor (6.1), tem-se:

$$\frac{dE'}{dt} = \frac{1}{T_o} [j(x - x')\dot{I}_1 - E' - j 2\pi f_1 S E'] \quad (6.2)$$

$$\dot{V}_t - E' = (V_1 + jx')\dot{I}_1 \quad (6.3)$$

$$T_e = R_e (E' \dot{I}_1^*) \quad (6.4)$$

6.3.4 - Inclusão no modelo do transitório mecânico do motor, os transitórios elétricos do estator e rotor

Em alguns casos a inclusão do transitório elétrico do estator pode ser feito. Certos estudos especiais têm sido feitos a respeito [9], mas estes tem mostrado não serem necessários e impraticáveis na utilização em estudos dinâmicos de sistemas envolvendo grandes máquinas.

O principal efeito do transitório do estator é na produção do "off-set" cc, na corrente de armadura e fluxo concatenado. Quando estas quantidades de corrente contínua são referidas aos eixos síncronos de rotação, neles aparecem quantidades da frequência fun-

damental. Os componentes fundamentais do torque elétrico são produzidas pelas componentes de corrente contínua, são muito pequenas para causar alterações no comportamento dinâmico [7], e nestes casos o transitório do estator pode ser desconsiderado.

6.4 - Modelo do motor de indução de gaiola dupla.

6.4.1 - Circuito equivalente em regime permanente

O motor de gaiola dupla pode ser representado através do circuito equivalente da figura 6.4.

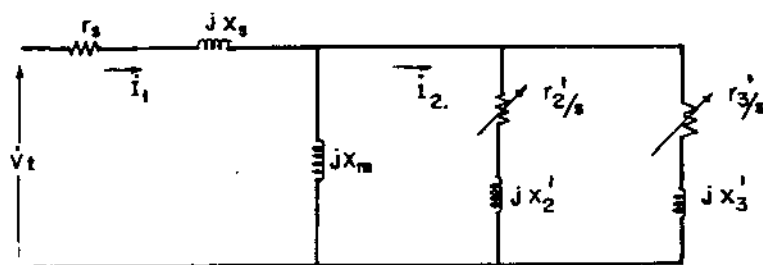


Figura 6.3 - Circuito equivalente do motor de gaiola dupla

onde:

$\dot{V}_t$ = tensão terminal

$\dot{I}_1, \dot{I}_2$ = corrente do rotor e estator

r_1, r_2', r_3' = resistência do estator, respectivamente, gaiola externa e gaiola interna

x_1, x_2', x_3' = reatância do estator, respectivamente, gaiola externa e gaiola interna

s = escorregamento

Um circuito similar ao da figura 6.1 pode ser obtido substituindo os dois circuitos paralelos (as gaiolas do rotor), por um simples circuito série de impedância R_e/s e jx_e como indicado na figura 6.4.

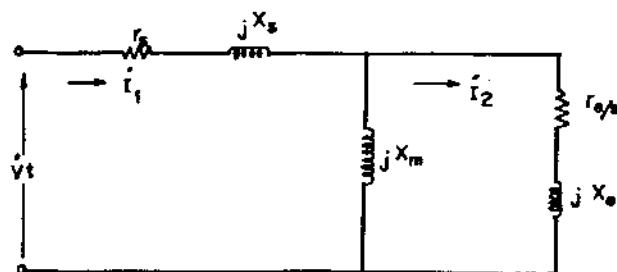


Figura 6.4 - Circuito com gaiola simples equivalente.

onde:

$$R_e = \frac{V_2 V_3 (V_2 + V_3) + s^2 (R_2 x_3^2 + V_3 x_2^2)}{(V_2 + V_3)^2 + s^2 (x_2 + x_3)^2} \quad (6.5)$$

$$X_e = \frac{V_2^2 x + V_3^2 x_2 + s^2 (x_2 + x_3) x_2 x_3}{(V_2 + V_3)^2 + s^2 (x_2^2 + x_3^2)^2} \quad (6.6)$$

No circuito equivalente a impedância do rotor, em alguns instantes durante o estudo de estabilidade transitória é assumido o valor de regime permanente em função do escorregamento, para o circuito equivalente. É importante notar que o valor da reatância e resistência da gaiola do circuito, x_e e R_e variam com o escorregamento.

6.4.2 - Inclusão do transitório mecânico somente.

O motor de indução de gaiola dupla pode ser representado usando o circuito equivalente em estado permanente conforme representado na figura 6.4, com a equação de movimento mecânico.

Esta equação é da por [7], [18]:

$$P\delta^2 = \frac{\omega}{H} (T_e - T_m) \quad (6.7)$$

onde:

δ = ângulo de carga

H = constante de inércia

T_e = torque elétrico

T_m = torque mecânico

Nesta representação o transitório mecânico é considerado e todo o transitório elétrico é desprezado.

6.4.3 - Inclusão do transitório mecânico e elétrico do rotor.

A análise da representação do motor de gaiola dupla, incluindo o transitório mecânico e elétrico do rotor, é obtido [7, 3, 18]. O circuito equivalente portanto está representado na figura 6.6.

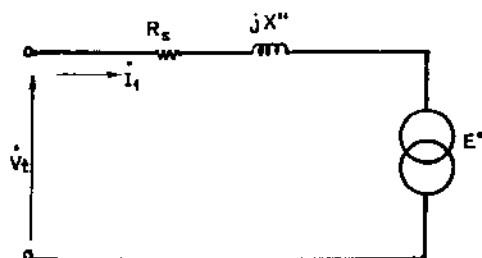


Figura 6.5 - As equações equivalentes para representação do comportamento transitório do motor de gaiola dupla incluindo o transitório do rotor.

As equações derivadas da representação [3], [7], [18].

$$pE'' = \frac{1}{T_O''} [j(x' - x'') \dot{I}_1 + E' - E''] + pE' + j2\pi f s(E' - E'') \quad (6.8)$$

$$pE'' = \frac{1}{T'_O} [j(x - x') \dot{I}_1 - E'] - j2\pi f_1 s E' \quad (6.9)$$

$$\dot{V}_t - E'' = (r_1 + jx'') \dot{I}_1 \quad (6.10)$$

$$\dot{V}_t - E' = (r_1 + jx') \dot{I}_1 \quad (6.11)$$

$$T_e = r_e (E'' \dot{I}_1^*) \quad (6.12)$$

sendo:

$$x = x_1 + X_m \quad (6.13)$$

$$x' = x_1 + \frac{x_2 X_m}{x_2 + X_m} \quad (6.14)$$

$$x'' = x_1 + \frac{x_2 x_3 X_m}{x_2 x_3 + x_2 X_m + x_3 X_m} \quad (6.15)$$

$$T'_O = \frac{x_2 + X_m}{2 f_1 r_2} \quad (6.16)$$

$$T''_O = \frac{x_3 + \frac{x_2 X_m}{x_2 + X_m}}{2\pi f_1 r_3} \quad (6.17)$$

onde:

E'' = tensão atrás da reatância subtransitória

E' = tensão atrás da reatância transitória

x = reatância de circuito aberto

x' = reatância transitória

x'' = reatância sub-transitória

T'_0 = constante de tempo transitória em circuito aberto

T''_0 = constante de tempo sub-transitória em circuito aberto.

As equações acima conjuntamente com a equação (6.8) são utilizadas na representação transitória do motor de indução de gaiola dupla, adotadas neste trabalho.

6.4.4 - Fator de gaiola

Uma maneira de se obter a representação da característica do torque do motor de gaiola dupla, a partir do motor de indução de gaiola simples é utilizar o fator de gaiola (K). Ele tem o efeito de recalcular a resistência do rotor para cada escorregamento através da expressão:

$$r_3 = r'_2 (1 + K_1 s) \quad (6.18)$$

onde:

r'_2 = resistência à velocidade síncrona

s = escorregamento absoluto em [pu]

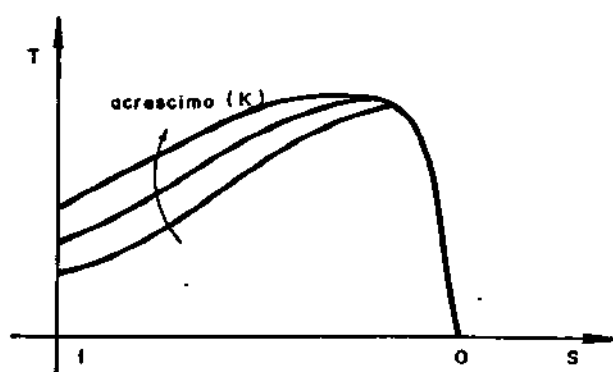


Figura 6.6 - Característica de torque do motor de indução considerando o efeito da variação do fator de gaiola.

O efeito de (K) pode ser vista na figura 6.7, com sua influência maior no período de partida do motor, tem-se para um motor de gaiola simples $K = 0$.

6.5 - Implementação Digital dos Dispositivos de partida

A figura 6.7, ilustra a alimentação de um motor de indução através de um dispositivo genérico de partida, o qual pode constituir-se de uma das formas indicadas.

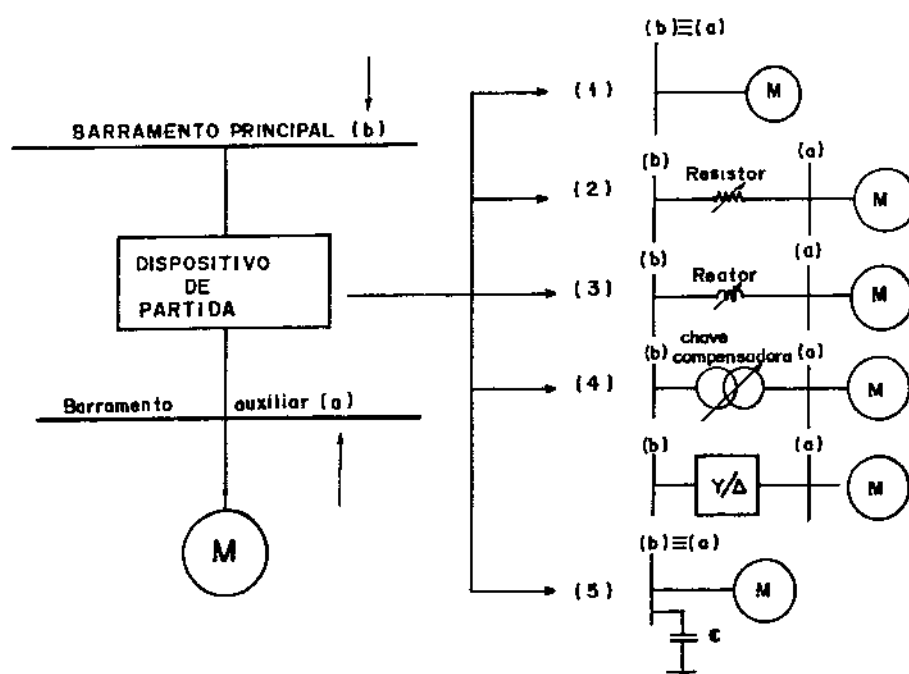


Figura 6.7 - Representação dos tipos de partidas

- a) barramento auxiliar
- b) barramento principal

No programa utilizado, a simulação do dispositivo de partida é feita pela inserção de uma linha fictícia entre o barramento principal e o barramento auxiliar. A linha fictícia terá como parâmetros os valores definidos pelo dispositivo de partida e seus ajustes pelo sistema de partida.

Nos casos representados na figura 6.7, a partida direta do motor de indução não faz o uso da linha fictícia e do barramento auxiliar, sendo o motor chaveado diretamente no barramento principal.

Para as partidas com resistência e reatores utiliza-se a linha fictícia com os respectivos parâmetros, sendo o motor conectado ao barramento auxiliar. Nas partidas com chave compensadora e estrela-triângulo utiliza-se a linha fictícias com seu valor inicial, fazendo-se a redução da tensão através de taps de um auto-transformador também inserido entre os barramentos citados.

Para o caso particular da partida por capacitor paralelo este funciona como uma reatância capacitiva conectada em paralelo com o barramento do motor. Neste caso não se usa a citada linha fictícia.

Dentro do procedimento assumido pelo programa, a relação entre a tensão primária (V_p) e secundária (V_s), para o caso do auto-transformador, obedece a relação a seguir, onde o significado das variáveis pode ser visto na figura 6.8.

$$K_t = \frac{1 + t}{1} = \frac{V_p}{V_s} \quad (6.19)$$

onde:

K_t = relação de transformação da equação

$$t = K_t - 1 = \frac{V_p}{V_s} - 1 \quad (6.20)$$

ou

$$t_{\%} = \left(\frac{V_p}{V_s} - 1 \right) 100 \quad (6.21)$$

A equação (6.21) determina o "tap" do auto-transformador para uma dada tensão secundária (V_s) desejada em relação à tensão primária (V_p). A tabela 6.1, fornece várias relações.



Figura 6.8 - Representação do Auto-transformador.

V_p = tensão primária [pu]
 V_s = tensão secundária [pu]
 t = tap do transformador [pu]

Tabela 6.1 -

V_s relação a V_p	kt	$t\%$
200	0,5	-50,0
195	0,5128	-48,72
190	0,5268	-47,39
185	0,5404	-45,95
180	0,5556	-44,44
175	0,5714	-42,86
170	0,5882	-41,18
165	0,6061	-39,39
160	0,6250	-37,50
155	0,6552	-35,48
150	0,6667	-33,33
145	0,6897	-31,03
140	0,7143	-28,57
135	0,7407	-25,93

130	0,7692	-23,08
125	0,8	-20,00
120	0,8333	-16,67
115	0,8696	-13,04
110	0,9091	-9,09
105	0,9524	-4,76
100	1,0	0,0
95	1,0526	5,26
90	1,1111	11,11
85	1,1765	17,65
80	1,25	25,00
75	1,3333	33,33
70	1,4286	42,86
65	1,5385	53,85
60	1,6667	66,67
$57,73 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 100$	1,7322	73,22
55	1,8182	81,82
50	2,0	100,00
45	2,2222	122,22
40	2,5	125,00
35	2,8571	185,71
30	3,3333	233,33
25	4,0	300,00
20	5,0	400,00
15	6,6667	566,67
10	10,0	900,00
05	20,0	1.900,00

Tabela 6.1 – Relação da tensão secundária (V_s) em "tap" de auto-transformadores.

6.6 - Simulação Digital

A figura 6.9, indica o diagrama unifilar de um sistema simplificado utilizado para ilustrar o uso do programa, assim como estabelece termos comparativos entre os métodos de partida citados.

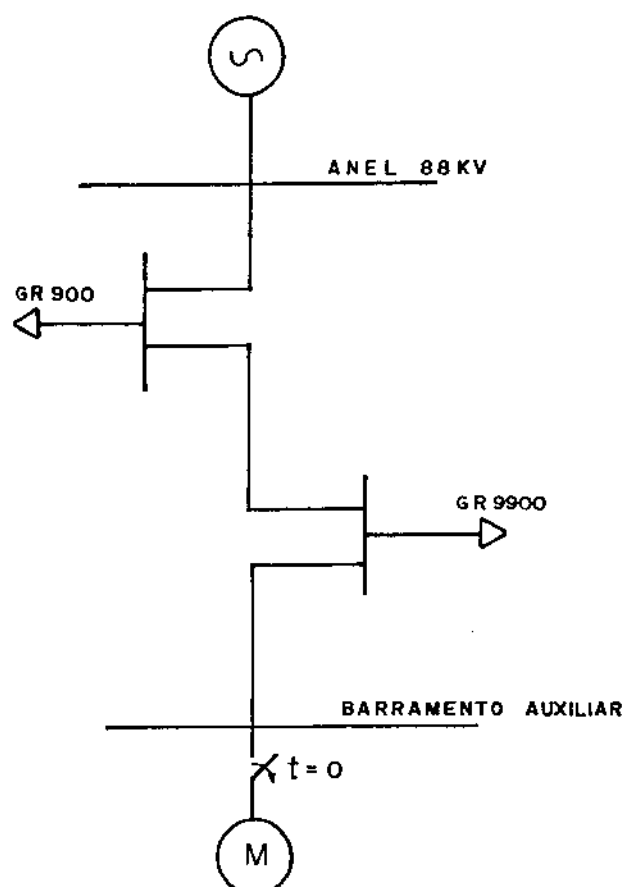


Figura 6.9 - Diagrama Unifilar do Sistema Simulado

Através do diagrama da figura 4.9, e utilizando-se de um programa de estabilidade transitória, onde foram implantados os modelos matemáticos do motor de indução discutidos anteriormente, executou-se os vários tipos de partidas convencionais do motor de indução, bem como a partida com capacitor. Desenvolveu-se uma vibrante de plotagem, para se estudar o comportamento da corrente, tensão, potência ativa e reativa, em função do escorregamento, solicitada do sistema elétrico de alimentação durante o período de aceleração do motor até que o mesmo atinge-se o permanente.

6.6.1 - Caso 1 - Partida direta do motor de indução

Verifica-se que partindo de forma direta o motor de indução de 750 KW, este apresenta no instante inicial de partida, no tempo zero ($s = 100\%$), uma tensão de 0,8660 [pu], potência ativa 0,6849 [pu], potência reativa 3,6368 [pu], corrente 0,0427 [pu], e que ocorre flutuação em todas as curvas levantadas durante o período inicial de partida.

Para o caso da partida direta o tempo do acionamento até a máquina atingir o escorregamento de aproximadamente 6% no ponto de operação, é de 7,7 segundos, apresentado neste instante uma tensão terminal 0,9305 [pu], potência ativa 1,1617 [pu], potência reativa 0,7139 [pu], e corrente terminal de 0,0147 [pu].

SISTEMA ELETRICO DE POTENCIA - ESTUDO DE ESTABILIDADE TRANSITORIA

CARACTERISTICAS GERAIS DO SISTEMA

ANALISE DE PARTIDA DE MOTORES DE INDUCAO - SISTEMA COSIPA
 ESTAGIO - II
 ESTUDO DA PARTIDA DO MOTOR DE 750 KW - PARTIDA DIRETA
 UFU - DEE - CETEC - CEPRO
 FREQUENCIA DO SISTEMA = 60.00 HERTZ
 M.V.A. BASE = 100.0 M.V.A.

DADOS DO SISTEMA EM ESTADO PERMANENTE

DADOS DO FLUXO DE CARGA

I	BARRA	TENSÃO	ANG.	MW GER	MVAR GER	CARGA MW	CARGA MVAR	I
I	ANEL88KV	1.00000	0.0	8.03900	5.18270	0.0	0.0	I
I	GR900	0.97040	-2.48032	0.0	0.0	6.04000	3.40000	I
I	GR9900	0.94875	-4.11220	0.0	0.0	1.95000	1.21000	I

OBS. OS DADOS ACIMA INCLUEM OS MOTORES DE INDUCAO.

DADOS DAS LINHAS

I	BARRA	BARRA	RESISTENCIA	REATANCIA	SUSCEPTANCIA	TAP	I
I	EMISSORA	RECEPTORA	P.U.	P.U.	P.U.	P.C.	I
I	ANEL88KV	GR900	0.03010	0.54180	0.0	0.0	I
I	GR900	GR9900	0.13280	1.46050	0.0	0.0	I

OBS. IMPEDANCIA SHUNT DESIGNADA POR - *

----- LINHAS MONITORADAS -----

I	BARRA	BARRA	RESISTENCIA	REATANCIA	SUSCEPTANCIA	TAP	I
I	EMISSORA	RECEPTORA	P.U.	P.U.	P.U.	P.C.	I
I	ANEL88KV	GR900	0.03010	0.54180	0.0	0.0	I
I	GR900	GR9500	0.13280	1.46050	0.0	0.0	I

----- DADOS DAS MAQUINAS SINCRONAS -----

PARAMETROS DAS MAQUINAS

I	BARRA	MAQUINA	MVA	CONST.	(----- REATANCIAS (P.U.) -----)					RESIST.(----- O/C TCS (SEGS) -----)					FATOR		
I	NOME	NO	MODEL	BASE	INERC.	TRANSITORIA	SINCRONA	SUBTRANSITORIA	POT-	ARM.	TRANSITORIA	SUBTRANSITORIA	SATURACAO				
I				DADO KWSKVA EIXO-D EIXO-Q EIXO-D EIXO-Q EIXO-D EIXO-Q EIXO-D EIXO-Q										IER (P.U.)	EIXO-D EIXO-Q EIXO-D EIXO-Q		
I	ANEL88KV	1	1	100.00	INFIN.	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0	0.0001	INFIN.	INFIN.	0.0	0.0	0.0

I	NOME DA	MAQ	POTENCIA	DE SAIDA	DA MAQUINA	FATOR	I
I	BARRA	NO.	MW		MVAR	AMORTECIMENTO	I
I	ANEL88KV	1	8.03900		5.18270	0.0	I

----- DADOS DO REGULADOR AUTOMATICO DE TENSÃO -----

NOME DA	HQ	AVR	FILTRO	REG.	REG.	CS.T.	(---LIMITE REG.---			EXCITADOR	F/BK	F/BK	CS.T.	LIMITE	EXCITADOR	SATUR.(SEI)		
BARRA	NO	TIPO	C.T.	GANHO	TA	TB	MAX	MIN	TAXA	GANHO	C.T.	GANHO	TF	TD	MAX	MIN	.75MAX	MAX
ANEL88KV	1	1	0.0	400.00	0.010	0.0	7.300	-7.300	99.99	1.000	0.080	1.000	1.000	0.0	3.920	0.0	0.500	0.860

REG.AUT.TENSÃO CONTROLA BARRA LOCAL EXCETO ONDE OUTRA FOR ESPECIFICADA

----- PARAMETROS DO THERMAL GOVERNOR TURBINE -----

NOME DA BARRA	MAQ. NO.	REGULACAO VELOCIDADE	FLYBALL GANHO	C.T.	SISTEMA DE CONTR. T1	CS.TEMPO T2	T3	TURBINA C.T.	TERMICA LIMITE(MW)
ANEL 88KV	1	0.0600	1.0000	0.0	0.2500	0.0	0.1000	0.3500	30.4000

* NOTA QUALQUER PARAMETRO NAO ESSENCIAL OMITIDO DOS DADOS *
 * DE ENTRADA ASSUME VALORES APROPRIADOS PARA UTILIZACAO NOS *
 * PROCESSOS DE CALCULO COMO MOSTRADO ACIMA. *
 * UM VALOR INDICADO COMO SENDO 9.999 OU 99.99 E NA REALIDADE *
 * 9999. *

DADOS DO MOTOR DE INDUCAO

PARAMETROS DO MOTOR

1	NOME	MTR. NO.	DE	MVA	TAXA	INERCA	RESISTENCIAS (PU)	1-----	REACTANCIAS (P.U.)-----	1	D/C TRANS	TIPO	FATOR DE			
1	BARRA	NO.	GAIOLAS	DADO	KV	KWS/KVA	ESTATOR	ROTOR	ESTATOR	ROTOR	MAGNETIZ.	U/L	TRANS	C.T. (SEG)	CARGA	GAIOLA
1	GR5900	1	1	0.880	0.0	4.0000	0.03300	0.03300	0.0800	0.1000	2.0000	2.0000	0.1752	0.16880	0	0.0

1	NOME	MOTOR	PCF. ENTRADA DO MOTOR	LSCURREG.	1
1	BARRA	NO.	Mh	MVAR	P.C.
1	GR9900	1	0.06000	0.0	100.000
1	INICIALMENTE O MOTOR ACIMA ESTA DESCONECTADO DO SISTEMA				

LAPGAS SHUNT

1	BARRA	MEGAKATIS	MEGAVARS	1
1	GR900	6.04000	3.40000	1
1	GR9900	1.95000	1.21000	1

SISTEMA 1 CASE NO. 1

MAQ. REF. = M1. 1 NA BARRA ANEL38KV
 STEP DE INTEGRACAO (SEG) = 0.025000
 DURACAO DO ESTUDO (SEG) = 10.000000
 INTERVALO DE IMPRESSAO (SEG) = 0.050000
 ANGULO LIMITE DA MAQ. SINC. = 540.0GRAUS

** NAO HA OPERACOES DE CHAVEAMENTO **

OPERACOES DE CHAVEAMENTO DE MOTORES DE INDUCAO

NOME DA BARRA	MAQ NO.	OPERACOES DE CONTADORES (SEGS)				CONTATER SETTINGS				
		OUT	IN	OUT	IN	TENSAD DRGP-OUT	TENSAD PICK-UP	DELAY TIME	LOCK-OUT TIMER	UNDER-SPEED SETTING(PC)
GR9900	1					0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

CONDICÇÕES INICIAIS

MAQUINAS SINCRONAS

NOME DA BARRA	MAQ NO.	ANG. ROTOR GRAUS	ESCORREG. ROTOR P.U.	POTENCIA MECANICA MW	POT. DE SAIDA ATIVA MW	DE SAIDA REATIVA MVAR	TENSÃO TERMINAL P.U.	CORRENTE TERMINAL P.U.	TENSÃO DE CAMPO P.U.	CORRENTE DE CAMPO P.U.	FREQUENCIA GERADOR HZ
ANEL88KV	1 *	0.00	0.0	0.039	0.039	5.183	1.000	0.096	1.000	1.000	60.000

REFERENCIA A MAQUINA DESIGNADA PELO - * O ANGULO DESTA MAQUINA E RELATIVO AO SISTEMA ZERO

REGULADORES AUTOMATICOS DE TENSÃO

NOME DA MAQ BARRA	MAQ NO.	BARRA NO. CONTR.	1/P FILTRO VOLTS	AMPLIFICADOR SINAL	FEEDBACK SINAL
ANEL88KV	1	1.000	1.000	1.170	0.0

CARGA DOS MOTORES DE INDUCAO

NOME BARRA	MAQ NO	ESCORREG. ROTOR P.C.	POT. MEC. MW	POTENCIA DE ENTRADA ATIVA MW	DE ENTRADA REATIVA MVAR	TENSÃO TERMINAL P.U.	CORRENTE TERMINAL P.U.	TURQUE (MJ) CARGA	MOTOR
GR9900	1	100.0000	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0598	0.0

TENSÃO NAS BARRAS

BARRA	TENSÃO	ANGULO	BARRA	TENSÃO	ANGULO	BARRA	TENSÃO	ANGULO	BARRA	TENSÃO	ANGULO
ANEL88KV	1.000	0.00	GR900	0.970	-2.48	GR9900	0.949	-4.15			

FLUXO DAS LINHAS

BARRA ENVIANDO		BARRA RECEBENDO	R P.U.	X P.U.	ENVIANDO-FIM				RECEBENDO-FIM			
					TENSÃO P.U.	ANGULO	CORRENTE P.U.	POTENCIA P(MW)	TENSÃO P.U.	ANGULO	CORRENTE P.U.	POTENCIA P(MW)
ANEL88KV	GR900		0.03010	0.54180	1.000	0.0	0.096	8.02	0.970	-2.5	0.096	8.00
GR900	GR9900		0.13280	1.46050	0.970	-2.5	0.024	1.96	0.949	-4.1	0.024	1.95

MOTOR DE INDUCAO NO. 1 NA BARRA GR9900 SWITCHED IN AO TEMPO DE 0.0 SEGUNDOS

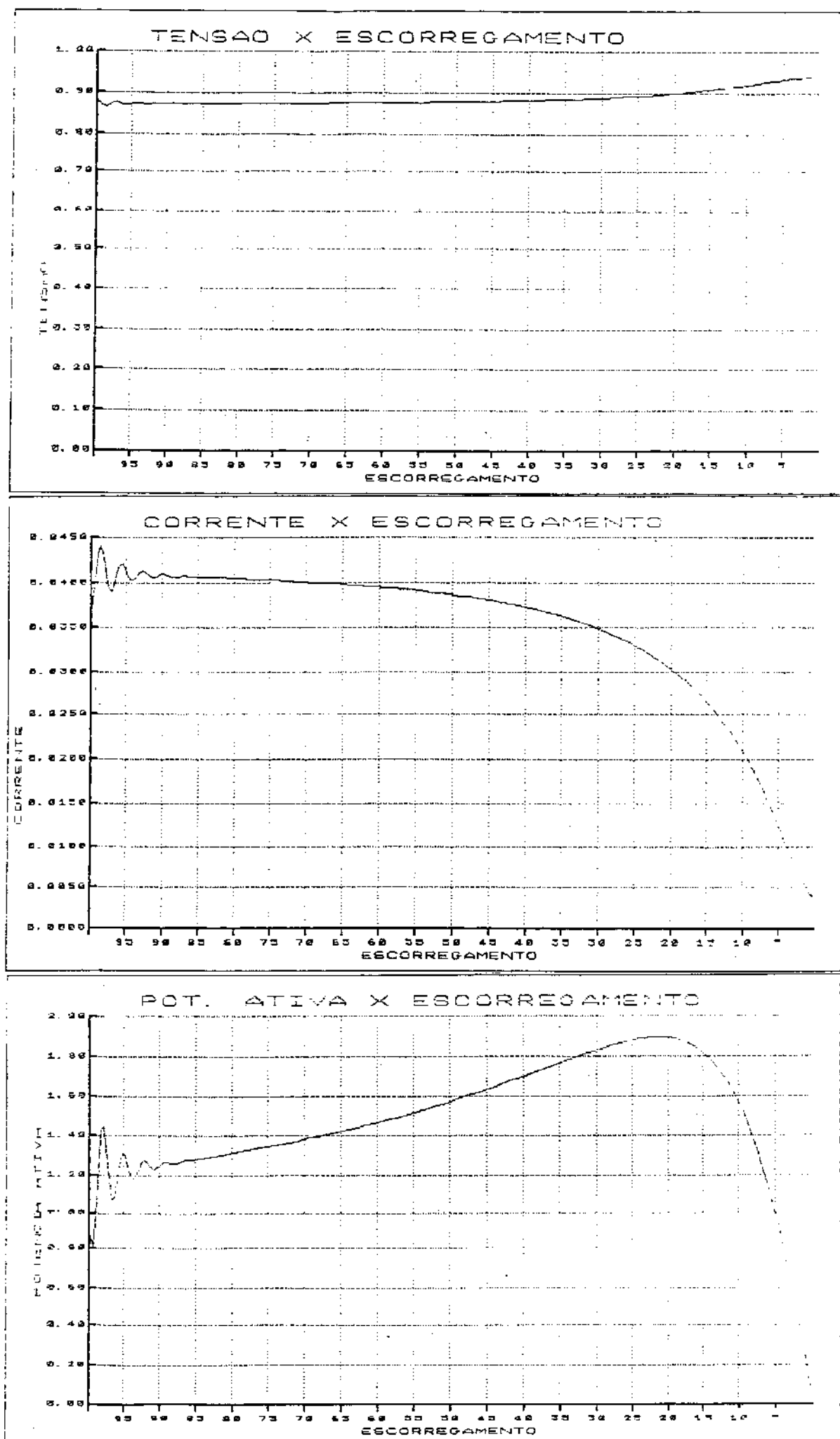


Figura 6.11 - Partida direta

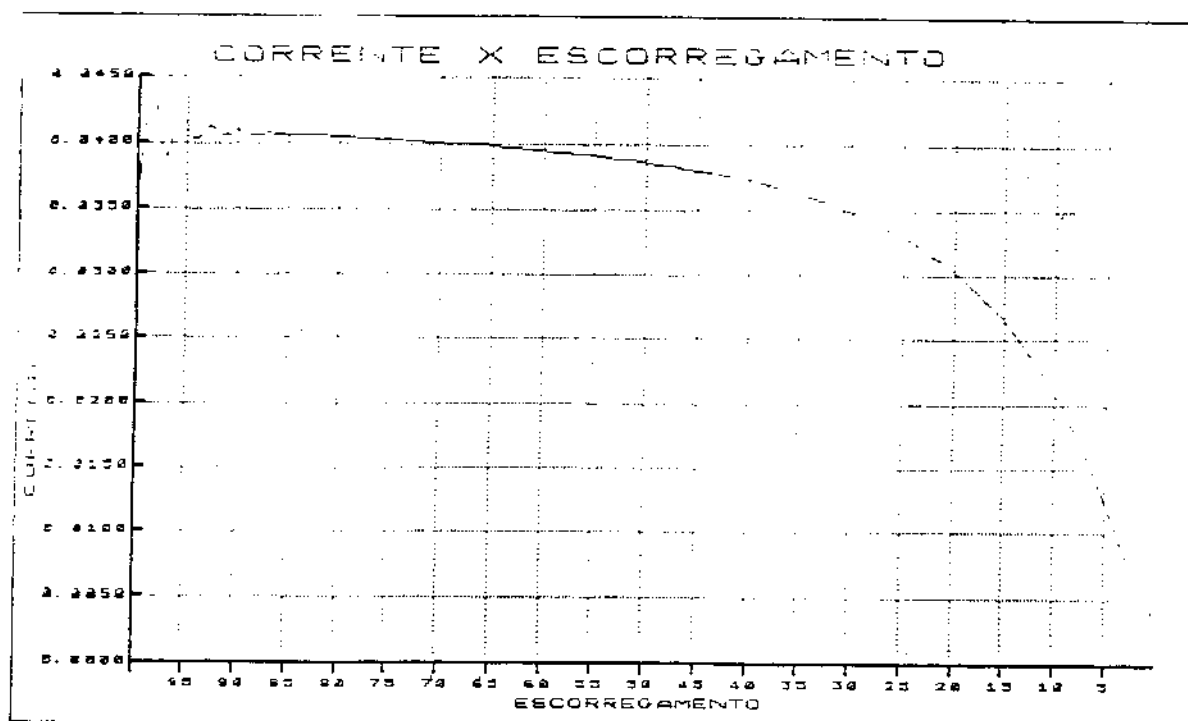


Figura 6.11 - Partida direta

6.6.2 - Caso 2 - Partida com auto-transformador

Verifica-se que a tensão aplicada no instante de partida aos terminais do motor é de 0,6992 [pu], a potência ativa 0,4465 [pu], a potência reativa 2,371 [pu], a corrente terminal 0,0354 [pu]. Comparando com a partida direta, para uma mesma carga aplicada ao motor, há uma redução da tensão do auto-transformador, e como consequência há uma redução da corrente terminal do motor no instante inicial de partida.

O tempo do acionamento até a máquina atingir o escorregamento de aproximadamente 6%, no ponto de operação é de 9,7 segundos, apresentando neste instante uma tensão terminal de 0,9331 [pu], potência ativa 0,9996 [pu], potência reativa 0,6141 [pu], e corrente terminal de 0,0126 [pu].

Verifica-se que qualquer alteração das condições iniciais de partida afetam o tempo de acionamento e as condições, do ponto de operação, comparativamente a partida direta.

SISTEMA ELETRICO DE POTENCIA - ESTUDO DE ESTABILIDADE TRANSITORIA

CARACTERISTICAS GERAIS DO SISTEMA

ANALISE DE PARTIDA DE MOTORES DE INDUCAO - SISTEMA CO-IPA
 ESTAGIO - II
 ESTUDO DA PARTIDA DO MOTOR DE 750 KW - COM AUTO-TRANSFORMADOR
 UFU - DEE - CEPEC - CEPED
 FREQUENCIA DO SISTEMA = 60.00 HERTZ
 M.V.A. BASE = 100.0 M.V.A.

DADOS DO SISTEMA EM ESTADO PERMANENTE

DADOS DO FLUXO DE CARGA

I	BARRA	TENSAO	ANG.	MW GER	MVAR GER	CARGA MW	CARGA MVAR	I
1	ANEL88KV	1.00000	0.0	8.03900	5.10270	0.0	0.0	1
1	GR900	0.97040	-2.42032	0.0	0.0	6.04300	3.40000	1
1	GR9900	0.94875	-4.11220	0.0	0.0	1.95000	1.21000	1
1	AUXILIAR	0.94875	-4.11220	0.0	0.0	0.0	0.0	1

OBS. OS DADOS ACIMA INCLUEM OS MOTORES DE INDUCAO.

DADOS DAS LINHAS

I	BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	RESISTENCIA P.U.	REACTANCIA P.U.	SUSCEPTANCIA P.U.	TAP P.C.	I
1	ANEL88KV	GR900	0.03010	0.54180	0.0	0.0	1
1	GR900	GR9900	0.13280	1.46050	0.0	0.0	1
1	GR9900	AUXILIAR	0.0	0.00001	0.0	0.0	1

OBS. IMPEDANCIA SHUNT DESIGNADA POR - *

LINHAS MONITORADAS

I	PARA	BARRA	RESISTENCIA	REACTANCIA	SUSCEPTANCIA	IAP	I
I	EMISSORA	RECEPTORA	P.U.	P.U.	P.U.	P.C.	I
1	ANEL88KV	GR900	0.03010	0.54180	0.0	0.0	1
1	GR900	GR9900	0.13200	1.46050	0.0	0.0	1
1	GR9900	ALXILIA	0.0	0.00001	0.0	0.0	1

DADOS DAS MAQUINAS SINCRONAS

PARAMETROS DAS MAQUINAS

I	BARRA	MAQUINA	MVA	CONST.	REACTANCIAS (P.U.)				RESIST.	O/C	TCS	ISEGS	FATOR	
I	NOME	NC	MUDEL	BASE	INERC.	TRANSITORIA	SINCRONA	SUBTRANSITORIA	POT-	ARM.	TRANSITORIA	SUBTRANSITORIA	SATURACAO	
I				CACO	KVSKVA	EIXO-D	EIXO-Q	EIXO-D	EIXO-Q	1ER	(P.U.)	EIXO-D	EIXO-Q	
I	ANEL88KV	1	1	100.00	INFIN.	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0	0.0001	INFIN.	INFIN.	0.0

I	NOME DA	MAQ	POTENCIA DE SAIDA DA MAQUINA	FATOR
I	BARRA	NO.	MW	AMORTECIMENTO
1	ANEL88KV	1	8.03900	5.18270
				0.0

DADOS DO REGULADOR AUTOMATICO DE TENSAO

NOME DA	NC	AVR	FILTRO	REG.	REG.	CS.T.	(---)	LIMITE	REG.	(---)	EXCITADOR	FZBK	FZBK	CS.T.	LIMITE	EXCITADOR	SATUR.(%)
BARRA	NC	TIPO	C.T.	GANHO	TA	TB	MAX	MIN	TAXA	GANHO	C.T.	GANHO	IF	TD	MAX	MIN	.75MAX
ANEL88KV	1	1	0.0	400.00	0.010	0.0	7.300	-7.300	99.99	1.000	0.080	1.000	1.000	0.0	3.920	0.0	0.500

REG-AUT.TENSAO CONTROLA BARRA LOCAL EXCETO ONDE OUTRA FOR ESPECIFICADA

PARAMETROS DO THERMAL GOVERNOR TURBINE

NOME DA	MAQ.	REGULACAO	FLYBALL	SISTEMA	DE CONTR.	CS.	TEMPO	TURBINA	TERMICA
BARRA	NC.	VELOCIDADE	GANHO	C.T.	T1	T2	T3	C.T.	LIMITE(MW)
ANEL88KV	1	0.0600	1.0000	0.0	0.2500	0.0	0.1000	0.3500	30.4000

* NOTA QUALQUER PARAMETRO NAO ESSENCIAL OMITIU OS DADOS *

* DE ENTRADA ASSUME VALORES APROPRIADOS PARA UTILIZACAO NUS *

* PROCESSOS DE CALCULO COMO MOSTRADO ACIMA. *

* UM VALOR INDICADO COMO SENDO 9.999 OU 99.99 E NA REALIDADE *

* 9999. *

PARâMETROS DO MOTOR DE INDUÇÃO

PARâMETROS DO MOTOR

1	NOME	MTR. NO. DE	MVA	TAXA	INERÇIA	RESISTÊNCIAS (P.U.)	REACTÂNCIAS (P.U.)	O/C TRANS	TIPO	FATOR DE	1					
1	BARRA	NO. GAIOLAS	DADO	KV	KWS/KVA	ESTATOR	ROTOR	ESTATOR	ROTOR	MAGNETIZ. O/C	TRANS	C.T. (SEG)	CARGA GAIOLA	1		
1	AUXILIAR	1	0.880	0.0	4.0000	0.03300	0.03300	0.0800	0.1000	2.0000	2.0800	0.1752	0.16880	0	0.0	1

I	NOME	MOTOR	POT. ENTRADA DO MOTOR	ESCORREG.	I
I	BARRA	NO.	MW	MVAR	P.C.
I	AUXILIAR	1	0.06000	0.0	100.000
I	INICIALMENTE O MOTOR ACIMA ESTA DESCONECTADO DO SISTEMA				

CARGAS SHUNT

1	BARRA	MEGAWATTS	MEGAVARS	1
1	GR500	6.04000	3.40000	1
1	GR6900	1.95000	1.21000	1

SISTEMA 1 CASO NO. 1

MAQ. REF. = NC. 1 NA BARRA ANEL38KV
 STEP DE INTEGRACAO (SEG) = 0.025000
 DURACAO DO ESTUDO (SEG) = 10.000000
 INTERVALO DE IMPRESSAO (SEG) = 0.050000
 ANGULO LIMITE DA MAQ. SINC. = 540.0GRAUS

ESPECIFICACAO DAS OPERACOES DE CHAVEAMENTO

TEMPO CHAVEAMENTO	CHAVEAMENTO IN/OUT	BARRA ENVIANDO	BARRA RECEBENDO	RESISTENCIA P.U.	REACTANCIA P.U.	SUSCEPTANCIA P.U.	TAP P.C.
0.0	OUT	GR500	AUXILIAR	0.0	0.00001	0.0	0.0
0.0	IN	GR500	AUXILIAR	0.0	0.50000	0.0	25.00
5.0000	OUT	GR500	AUXILIAR	0.0	0.50000	0.0	25.00
5.0000	IN	GR500	AUXILIAR	0.0	0.00001	0.0	0.0

OPERACOES DE CHAVEAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO

NOME DA BARRA	MAQ. NO.	OPERACOES DE CONTACTORES (SEGS)	TENSÃO DROP	ENTRADA TENSÃO PICK-UP	SETTINGS DELAY TIME	LOCK-OUT TIME	UNDER-SPEED SETTING (PC)
AUXILIAR	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

CONDICOES INICIAIS

MAQUINAS SINCRONAS

NUM. DA BARRA	MAC NO.	ANG. RTOCH GRAUS	ESCORREG. RTOCH P.U.	POTENCIA MECANICA MW	POT. DE SAIDA ATIVA MW	DESAIDA REATIVA MVAR	TENSAO TERMINAL P.U.	CORRENTE TERMINAL P.U.	TENSAO DE CAMPO P.U.	CORRENTE DE CAMPO P.U.	FREQUENCIA GERADORA HZ
ANEL88KV	1	0.00	0.0	8.039	8.034	5.183	1.000	0.970	1.000	1.000	60.000

REFERENCIA A MAQUINA DESIGNADA PELO - * O ANGULO DESTA MAQUINA E RELATIVO AO SISTEMA ZERO

REGULADORES AUTOMATICOS DE TENSÃO

NUM. DA BARRA	MAC NO.	BARRA NO.	1/P. FILTRO CONTR. VOLTS	AMPLIFICADORA SINAL	FEEDBACK SINAL
ANEL88KV	1	1.000	1.000	1.170	0.0

CARGA DES MOTORES DE INDUÇAO

NOME BARRA	MAC NO.	ESCORREG. RTOCH P.U.	POT. MEC. MW	POTENCIA DE ENTRADA ATIVA MW	DESAIDA REATIVA MVAR	TENSAO TERMINAL P.U.	CORRENTE TERMINAL P.U.	TORQUE (MJ) CARGA MOTOP
AUXILIAR	1	100.0000	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0000

TENSÃO NAS BARRAS

BARRA	TENSÃO	ÂNGULO	BARRA	TENSÃO	ÂNGULO	BARRA	TENSÃO	ÂNGULO	BARRA	TENSÃO	ÂNGULO
ANEL88KV	1.000	0.00	GR900	0.970	-2.48	GR9900	0.949	-4.15	AUXILIAR	0.949	4.15

FLUXO DAS LINHAS

BARRA		R		X		FAVIANDE-FIM				RECEBENDO-FIM				
ENVIANDO	RECEBENDO	P.U.	P.U.	P.U.	ÂNGULO	P.U.	POTENCIA	POTENCIA	TENSÃO	TENSÃO	CORRENTE	CORRENTE	POTENCIA	POTENCIA
							(P(W))	(Q(MVAR))					(P(W))	(Q(MVAR))
ANEL88KV	GR900	0.03010	0.54160	1.000	0.0	0.050	8.02	5.19	0.970	-2.5	0.050	8.00	4.69	
GR900	GR9900	0.13260	1.46050	0.970	-2.5	0.024	1.96	1.30	0.949	-4.1	0.024	1.95	1.21	
GR9900	AUXILIAR	0.0	0.00001	0.949	-4.1	0.000	0.00	0.00	0.949	-4.1	0.000	0.00	0.00	

LINHA DE IMPEDANCIA 0.0 +J 0.00001 P.U. FOI DESLIGADA, ENTRE AS BARRAS GR9900 E AUXILIAR AO TEMPO DE 0.0 SEGUNDOS

LINHA DE IMPEDANCIA 0.0 +J 0.78125 P.U. FOI LIGADA ENTRE AS BARRAS GR9900 E AUXILIAR AO TEMPO DE 0.0 SEGUNDOS

MOTOR DE INDUÇAO NO. 1 NA BARRA AUXILIAR SWITCHED IN AO TEMPO DE 0.0 SEGUNDOS

LINHA DE IMPEDANCIA 0.0 +J 0.78125 P.U. FOI DESLIGADA, ENTRE AS BARRAS GR9900 E AUXILIAR AO TEMPO DE 5.0000 SEGUNDOS

LINHA DE IMPEDANCIA 0.0 +J 0.00001 P.U. FOI LIGADA ENTRE AS BARRAS GR9900 E AUXILIAR AO TEMPO DE 5.0000 SEGUNDOS

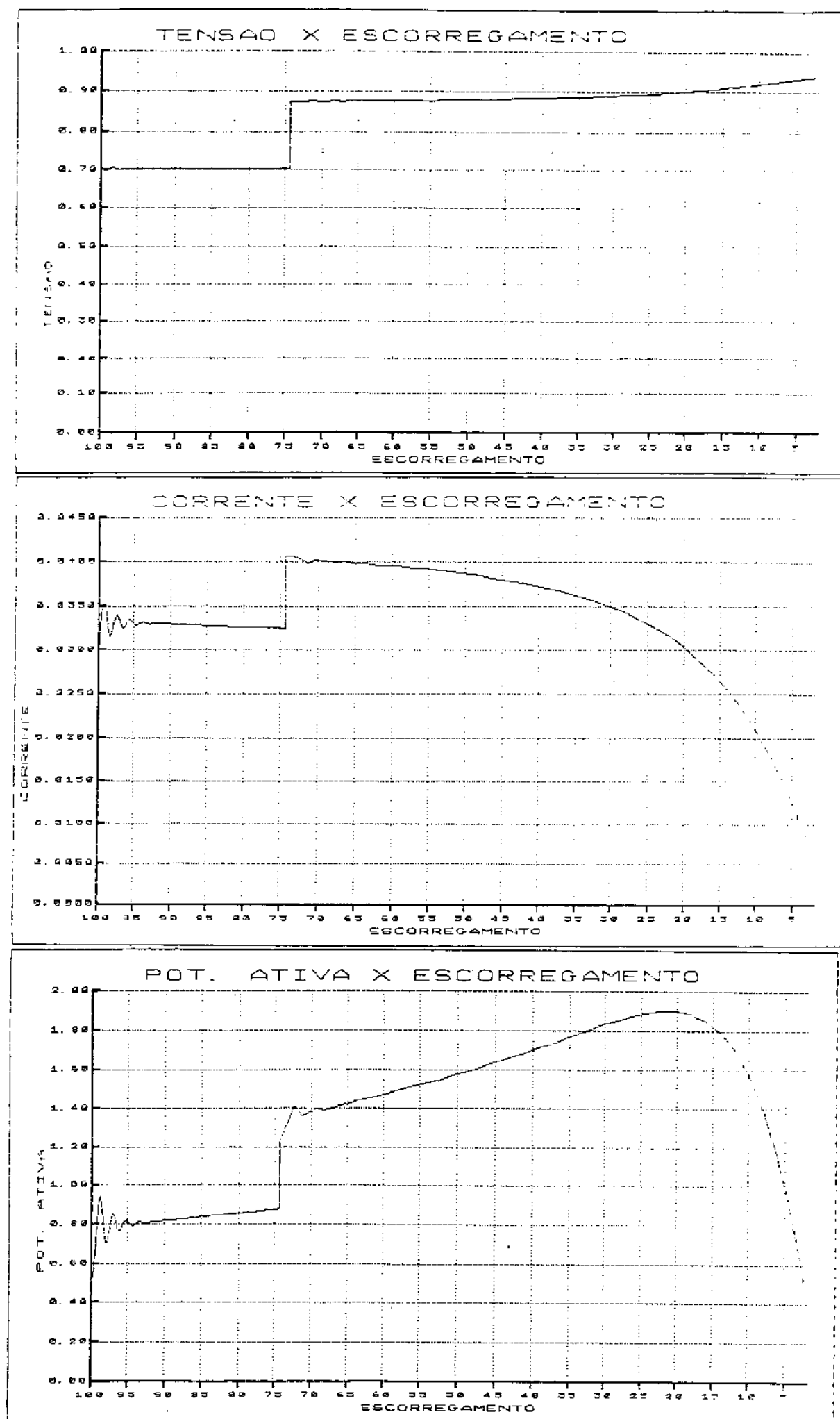


Figura 6.12 - Partida com auto-transformador

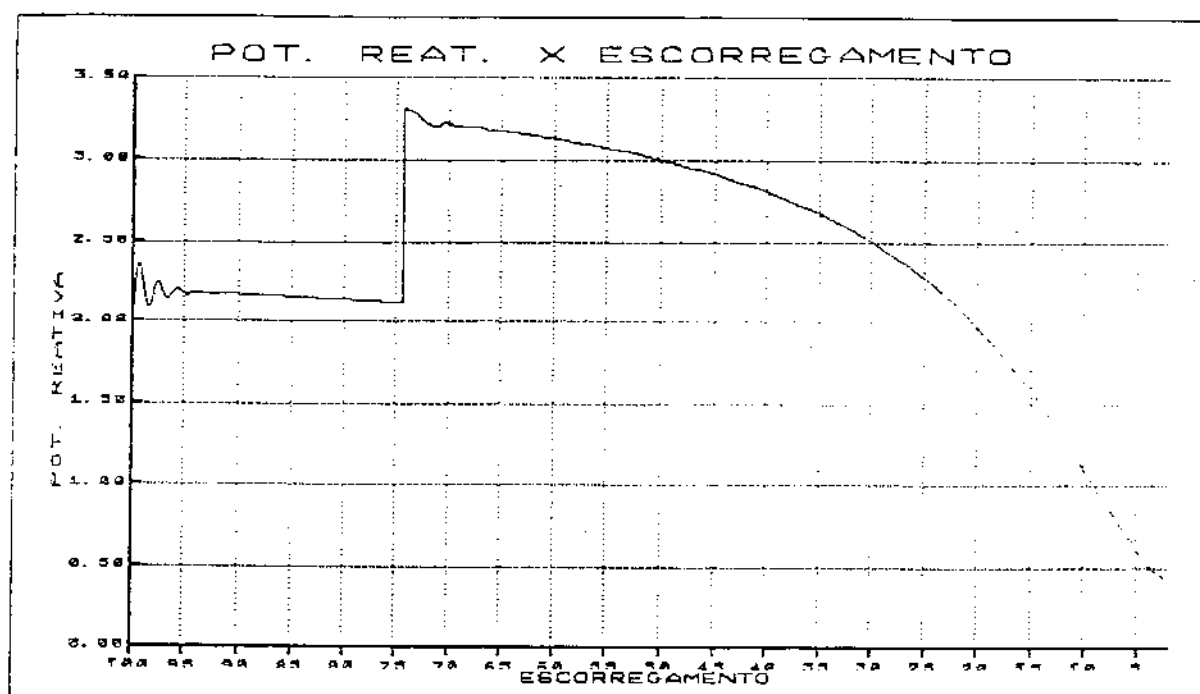


Figura 6.12 - Partida com auto-transformador

6.6.3 - Caso 3 - Partida estrela-triângulo

Verifica-se que a tensão aplicada no instante de partida aos terminais do motor é de 0,5307 [pu], a potência ativa 0,2572 [pu], a potência reativa 1,3660 [pu], a corrente nos terminais do motor 0,0262 [pu]. Comparando com a partida direta, para uma mesma carga aplicada no motor, há uma redução da tensão aplicada devido a mudança das ligações de Y para Δ , como consequência há uma redução da corrente terminal do motor solicitada do sistema de alimentação.

O tempo do acionamento até a máquina atingir o escorregamento de aproximadamente 6%, no ponto de operação, é de 9,8 segundos, apresentando neste instante uma tensão terminal de 0,9308 [pu], potência ativa 1,1434 [pu], potência reativa 0,7015 [pu], e corrente nos terminais do motor de 0,0144 [pu].

Verifica-se que qualquer alteração das condições iniciais de partida afetam o tempo de acionamento e as condições do ponto de operação, comparativamente a partida direta.

SISTEMA ELETRICO DE POTENCIA - ESTUDO DE ESTABILIDADE TRANSITORIA

CARACTERISTICAS GERAIS DO SISTEMA

ANALISE DE PARTIDA DE MOTORES DE INDUCAO - SISTEMA COSIPA
 ESTAGIO - II
 ESTUDO DA PARTIDA DO MOTOR DE 750 KW - PARTIDA COM CAPACITOR
 UFU - DEE - CETEC - CEPRO
 FREQUENCIA DO SISTEMA = 60.00 HERTZ
 M.V.A. BASE = 100.0 M.V.A.

DADOS DO SISTEMA EM ESTADO PERMANENTE

DADOS DO FLUXO DE CARGA

I	BARRA	TENSÃO	ANG.	MW GER	MVAR GER	CARGA MW	CARGA MVAR	I
I	ANEL88KV	1.00000	0.0	8.03900	5.18270	0.0	0.0	I
I	GR900	0.97040	-2.46032	0.0	0.0	6.04000	3.40000	I
I	GR9500	0.94875	-4.11220	0.0	0.0	1.95000	1.21000	I

OBS. OS DADOS ACIMA INCLUEM OS MOTORES DE INDUCAO.

DADOS DAS LINHAS

I	BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	RESISTENCIA P.U.	REACTANCIA P.U.	SUSCEPTANCIA P.U.	TAP P.C.	I
I	ANEL88KV	GR900	0.03010	0.54180	0.0	0.0	I
I	GR900	GR9500	0.13280	1.46050	0.0	0.0	I

OBS. IMPEDANCIA SHUNT DESIGNADA POR - *

CONDICOES INICIAIS

MAQUINAS SINCRONAS

NOME DA BARRA	MAC NO.	ANG. ROTOR GRAUS	ESCORREG. ROTOR P.U.	POTENCIA MECANICA MW	POT. ATIVA MW	DE SAIDA REATIVA MVAR	TENSAO TERMINAL P.U.	CORRENTE TERMINAL P.U.	TENSAO DE CAMPO P.U.	CORRENTE DE CAMPO P.U.	FREQUENCIA GERADOR HZ
ANEL88KV	1 *	0.00	* 0.0	8.039	8.039	5.183	1.000	0.096	1.000	1.000	60.000

REFERENCIA A MAQUINA DESIGNADA PELO - * O ANGULO DESTA MAQUINA E RELATIVO AO SISTEMA ZERO

REGULADORES AUTOMATICOS DE TENSAO

NOME DA BARRA	MAC NO.	BARRA NO.	CONTR. VOLTS	I/P FILTRO SINAL	AMPLIFICADOR SINAL	FEEDBACK SINAL
ANEL88KV	1	1.000	1.000	1.170	0.0	

CARGA DOS MOTORES DE INDUCAO

NOME BARRA	MAC NO	ESCORREG. ROTOR P.C.	POT. MEC. MW	POTENCIA ATIVA MW	DE ENTRADA REATIVA MVAR	TENSAO TERMINAL P.U.	CORRENTE TERMINAL P.U.	TORQUE (MJ) CARGA	MOTOR
GR9900	1	100.0000	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0093	0.0

TENSAO NAS BARRAS

BARRA	TENSAO	ANGULO	BARRA	TENSAO	ANGULO	BARRA	TENSAO	ANGULO	BARRA	TENSAO	ANGULO
ANEL88KV	1.000	0.00	GR900	0.970	-2.48	GR9900	0.949	-4.15			

FLUXO DAS LINHAS

BARRA ENVIANDO		BARRA RECEBENDO	R P.U.	X P.U.	[----- ENVIANDO-FIM -----]				[----- RECEBENDO-FIM -----]			
					TENSÃO		CORRENTE	POTÊNCIA	TENSÃO		CORRENTE	POTÊNCIA
					P.U.	ÂNGULO	P.U.	P(MW) Q(MVAR)	P.U.	ÂNGULO	P.U.	P(MW) Q(MVAR)
ANEL88KV	GR900		0.03010	0.54180	1.000	0.0	0.096	8.02 5.19	0.970	-2.5	0.096	8.00 4.69
GR900	GR9900		0.13280	1.46050	0.970	-2.5	0.024	1.96 1.30	0.949	-4.1	0.024	1.95 1.21

MOTOR DE INDUCAO NO. 1 NA BARRA GR9900 SWITCHED IN AO TEMPO DE 0.0 SEGUNDOS

LINHAS MONITORADAS

I	BARRA	BARRA	RESISTENCIA	REACTANCIA	SUSCEPTANCIA	TAP	I
I	EMISSORA	RECEPTORA	P.U.	P.U.	P.U.	P.C.	I
I	ANEL88KV	GR900	0.03010	0.54180	0.0	0.0	I
I	GR900	GR9500	0.13280	1.46050	0.0	0.0	I

DADOS DAS MAQUINAS SINCRONAS

PARAMETROS DAS MAQUINAS

I	BARRA	MAQUINA	MVA	CONST.	REACTANCIAS (P.U.)										RESIST.	D/C TCS (SEGS)										FATOR		
I	NOME	NO	MODEL	BASE	INERC.	TRANSITORIA	SINCRONA	SUBTRANSITORIA	POT-	ARM.	TRANSITORIA	SUBTRANSITORIA	SATURACAO	I													I	
I				DACC	KVSKVA	EIXO-C	EIXO-Q	EIXO-D	EIXO-Q	EIXO-D	EIXO-Q	EIXO-D	EIXO-Q	IER	(P.U.)	EIXO-D	EIXO-Q	EIXO-D	EIXO-Q									I
I	ANEL88KV	L	1	100.00	INFIN.	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0	I	0.0001	INFIN.	INFIN.	0.0	0.0							0.0	I	

I	NOME DA	MAQ	POTENCIA	DE SAIDA	DA MAQUINA	FATOR	I
I	BARRA	NO.	MW	MVAR	AMORTECIMENTO		I
I	ANEL88KV	1	8.03500	5.18270	0.0		I

DADOS DO REGULADOR AUTOMATICO DE TENSAO

NOME DA	MAQ	AVR	FILTRO	REG.	REG.	CS.T.	(---LIMITE REG.---		EXCITADOR	F/BK	F/BK	CS.T.	LIMITE	EXCITADOR	SATUR.(SE)			
BARRA	NO	TIPO	C.T.	Ganho	TA	TB	MAX	MIN	TAXA	Ganho	C.T.	Ganho	TF	TD	MAX	MIN	.75MAX	MAX
ANEL88KV	1	1	0.0	400.00	0.010	0.0	7.300	-7.300	99.99	1.000	0.080	1.000	1.000	0.0	3.920	0.0	0.500	0.660

REG.AUT.TENSAO CONTROLA BARRA LOCAL EXCETO ONDE OUTRA FOR ESPECIFICADA

PARAMETROS DO THERMAL GOVERNOR TURBINE

NOME DA	MAQ	REGULACAO	FLYBALL	SISTEMA DE CONTR.			CS.TEMPO	TURBINA	TERMICA
BARRA	NO.	VELOCIDADE	Ganho	C.T.	T1	T2	T3	C.T.	LIMITE(MW)
ANEL88KV	1	0.0600	1.0000	0.0	0.2500	0.0	0.1000	0.1500	30.4000

* NOTA QUALQUER PARAMETRO NAO ESSENCIAL CHITIDO DOS DADOS *

* DE ENTRADA ASSUME VALORES APROPRIADOS PARA UTILIZACAO NOS *

* PROCESSOS DE CALCULO COMO MOSTRADO ACIMA. *

* UM VALOR INDICADO COMO SENDO 9.999 OU 99.99 E NA REALIDADE *

* 9999. *

DADOS DO MOTOR DE INDUCAO

PARAMETROS DO MOTOR

1	NOME BARRA	MTR. NO.	NO. DE GAIOLAS	MVA CACO	TAXA KV	INPCIA KWS/KVA	RESISTENCIAS (PU) ESTATOR	ROTOR	REATANCIAS (P.U.) ESTATOR ROTOR MAGNETIZ. J/C TRANS				D/C TRANS C.T. (SEG)	TIPO CARGA	FATOR DE GAIOLA	
1	GR9900	1	1	0.880	0.0	4.0000	0.03300	0.03300	0.0800	0.1000	2.0000	2.1300	0.1752	0.16380	0	0.0

1	NOME	MOTOR	POT. ENTRADA DO MOTOR	ESCORREG.
1	BARRA	NO.	MW	MVAR
				P.C.
1	GR9900	1	0.06000	0.0
1	INICIALMENTE O MOTOR ACIMA ESTA DESCONECTADO DO SISTEMA			

CARGAS SHUNT

1	BARRA	MEGAWATTS	MEGAVARS	1
1	GR900	6.04000	3.40000	1
1	GR9900	1.95000	1.21000	1

SISTEMA 1 CASO NO. 1

MAQ. REF. = NC. 1 NA BARRA ANEL38KV
 STEP DE INTEGRACAO (SEG) = 0.029000
 DURACAO DO ESTUDO (SEGI) = 10.000000
 INTERVALO DE IMPRESSAO (SEG) = 0.050000
 ANGULO LIMITE DA MAQ. SINC. = 540.0 GRAUS

ESPECIFICACAO DAS OPERACOES DE CHAVEAMENTO

TEMPO CHAVEAMENTO	CHAVEAMENTO IN/OUT	BARRA ENVIANDO	BARRA RECEBENDO	RESISTENCIA P.U.	REATANCIA P.U.	SUSCEPTANCIA P.U.	TAP P.C.
0.0	IN	GR9900	*	0.0	-10.00000		

OPERACOES DE CHAVEAMENTO DE MOTORES DE INDUCAO

NOME DA BARRA	MAC NO.	OPERACOES DE CONTATORES OUT	IN	OUT	IN	CONTATOR TENSAO DRCP-OUT	SETTINGS TENSAO PICK-UP	DELAY TIME	LOCK-OUT TIMER	UNDER-SPEED SETTING (PC)
GR9900	1		0.0			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

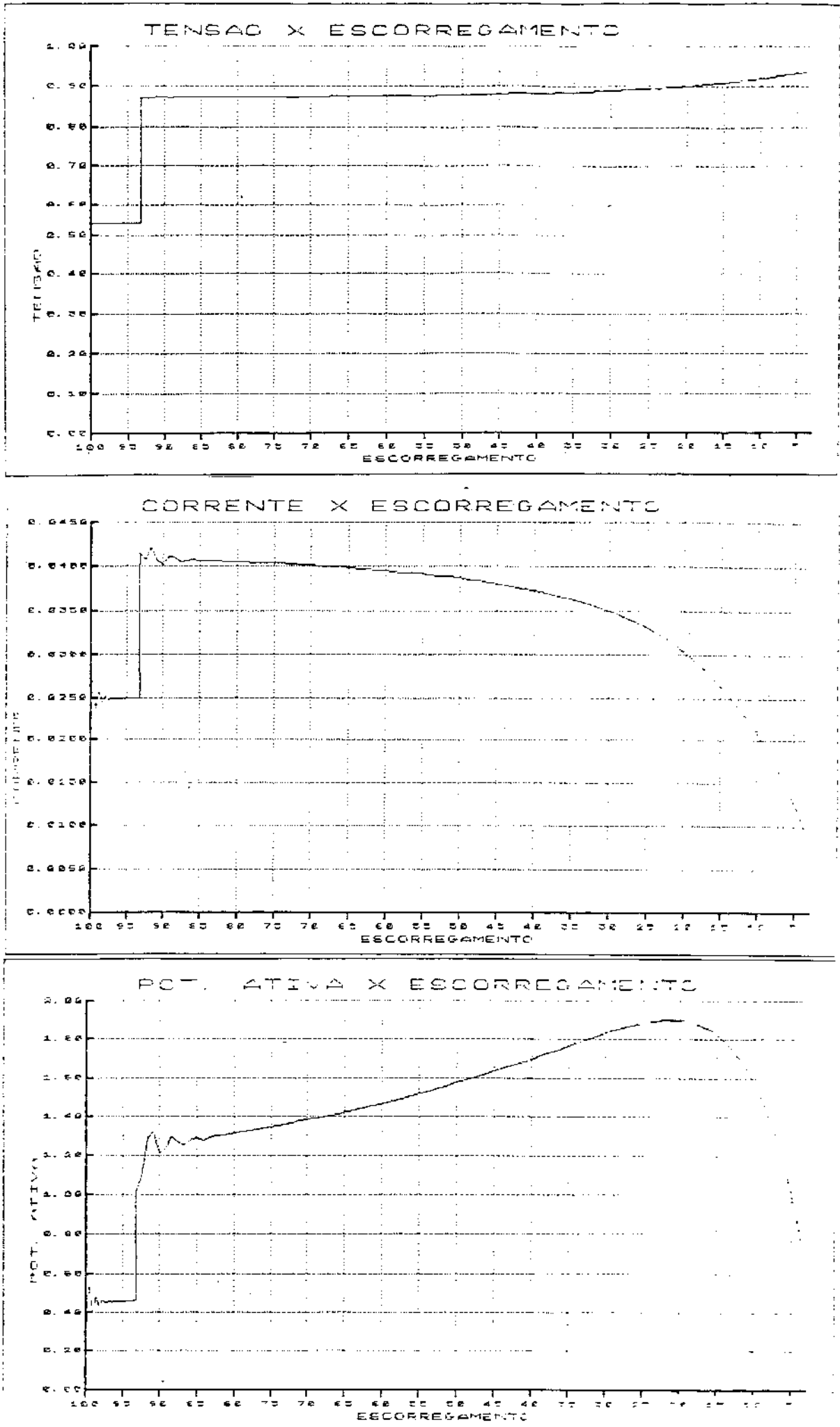


Figura 6.13 - Partida estrela-triângulo

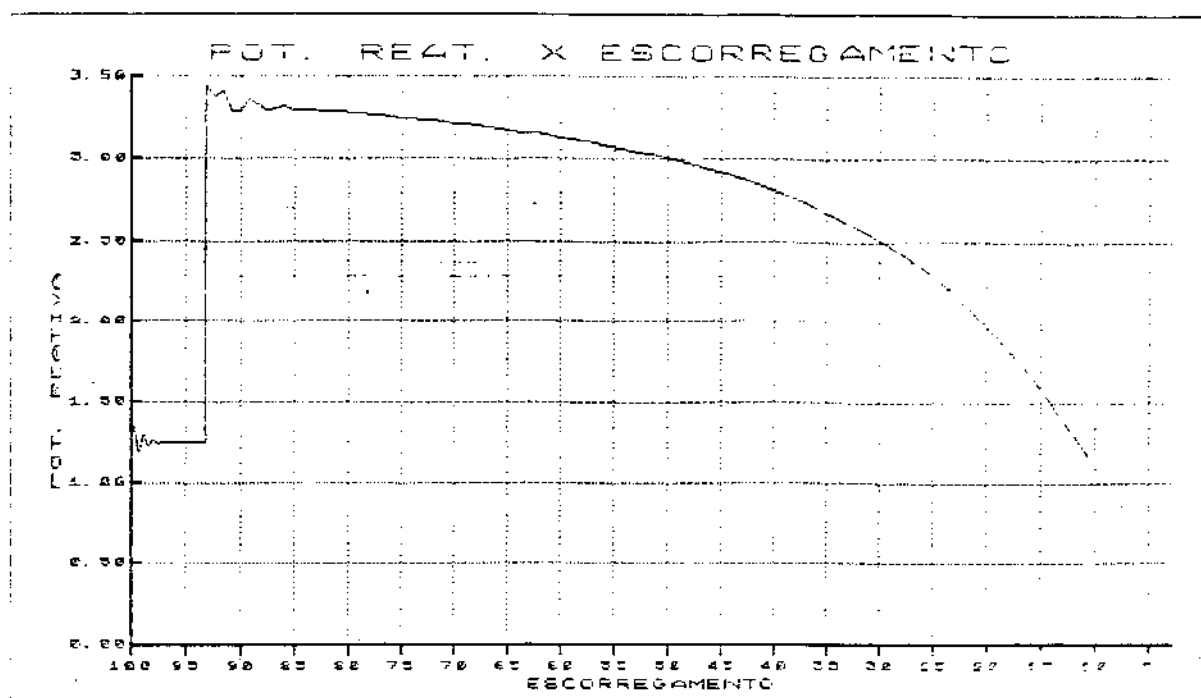


Figura 6.13 - Partida estrela-triângulo

6.6.4 - Caso 4 - Partida com resistência série

Verifica-se que a tensão aplicada no instante de partida aos terminais do motor é de 0,8139 [pu], a potência ativa 0,6050 [pu], a potência reativa 3,2129 [pu], e a corrente nos terminais do motor 0,0402 [pu]. Comparando com a partida direta, para uma mesma carga aplicada ao motor, há uma redução da tensão aplicada devido a inserção de resistência em série com o estator da máquina, reduzindo-se a corrente solicitada do sistema de alimentação.

O tempo do acionamento até a máquina atingir o escorregamento de aproximadamente 6%, no ponto de operação, é de 8,6 segundos, apresentando neste instante uma tensão terminal 0,9305 [pu], potência ativa 1,1567 [pu], potência reativa de 0,7105 [pu], e corrente nos terminais do motor 0,0146 [pu].

Verifica-se que alterações das condições iniciais de partida afetam o tempo de acionamento, e as condições do ponto de operação, comparativamente a partida direta.

SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA - ESTUDO DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

CARACTERÍSTICAS GERAIS DO SISTEMA

ANÁLISE DE PARTIDA DE MOTORES DE INDUÇÃO - SISTEMA ELÉTRICO
 ESTAGIO - II
 ESTUDO DA PARTIDA DE MOTOR DE 750 KW - ESTRELA - TRIÂNGULO
 UFU - DEE - CETEC - CEPRO
 FREQUÊNCIA DO SISTEMA = 60.00 HERTZ
 M.V.A. BASE = 100.0 M.V.A.

DADOS DO SISTEMA EM ESTADO PERMANENTE

DADOS DO FLUXO DE CARGA

I	BARRA	TENSÃO	ÂNG.	P.W. GER	MVAR GER	CARGA MW	CARGA MVAR	I
I	ANEL88KV	1.00000	0.0	8.03500	5.18270	0.0	0.0	I
I	GP900	0.97040	-2.48032	0.0	0.0	0.04000	3.40000	I
I	GR9900	0.94675	-4.11220	0.0	0.0	1.95000	1.21000	I
I	AUXILIAR	0.94675	-4.11220	0.0	0.0	0.0	0.0	I

QBS. OS DADOS ACIMA INCLUEM OS MOTORES DE INDUÇÃO.

DADOS DAS LINHAS

I	BARRA	BARRA	PESISTENCIA	REATANCIA	SUSCEPTANCIA	IAP	I
I	EMISSORA	RECEPTORA	P.U.	P.U.	P.U.	P.C.	I
I	ANEL88KV	GR900	0.03010	0.54180	0.0	0.0	I
I	GR900	GR9900	0.13280	1.46050	0.0	0.0	I
I	GR9900	AUXILIAR	0.0	0.00001	0.0	0.0	I

QBS. IMPEDANCIA SHUNT DESIGNADA POR - *

LINHAS MONITORADAS

1	BARRA	BARRA	RESISTENCIA	REACTANCIA	SUSCEPTANCIA	TAP	1
1	EMISSORA	RECEPTORA	P.U.	P.U.	P.U.	P.C.	1
1	ANELBKV	GRSCD	0.03010	0.54180	0.0	0.0	1
1	GP900	GRSSCO	0.13280	1.46050	0.0	0.0	1
1	GP9500	AUXILIAR	0.0	0.00001	0.0	0.0	1

DADOS DAS MAQUINAS SINCRONAS

PARAMETROS DAS MAQUINAS

1	BARRA	MAQUINA	MVA	CONST.	(-----	REACTANCIAS (P.U.)	-----	1	RESIST.	-----	O/C TCS (SEGS)	-----	FATOR	1				
1	NUME	NO	MODEL	BASE	INER.	TRANSITORIA	SINCRONA	1	SUBTRANSITORIA	POT.	ARM.	TRANSITORIA	SUBTRANSITORIA	SATURACAO	1			
1				DADO	KW/KVA	EIXO-D	EIXO-Q	1	FIXO-D	EIXO-Q	FIXO-D	EIXO-Q	FIXO-D	EIXO-Q	1			
1	ANELBKV	1	1	100.00	INFIN.	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0	0.0001	INFIN.	INFIN.	0.0	0.0	0.0	1

1	NUME DA	MAQ	POTENCIA	DE SAIDA	DA MAQUINA	FATOR	1
1	BARRA	NO.	MW	MVAR	AMORTECIMENTO	1	1
1	ANELBKV	1	8.03900	5.18270	0.0	1	1

DADOS DO REGULADOR AUTOMATICO DE TENSAO

NOME DA		PQ	AVR	FILTRO	REG.	REC.	CS.T.	(---LIMITE REG.---			EXCITADOR	F/BK	F/BK	CS.T.	LIMITE	EXCITADOR	SATUR.(SEI)	
BARRA	NO	TIPO	C.T.	GANHO	TA	18	MAX	MIN	TAXA	GANHO	C.T.	GANHO	TF	TD	MAX	MIN	.75MAX	MAX
ANELBKV	1	1	0.0	400.00	0.010	0.0	7.300	-7.300	99.99	1.000	0.000	1.000	1.000	0.0	3.920	0.0	0.500	0.660

REC.AUT.TENSAO CONTROLA BARRA LOCAL EXCETO ONDE OUTRA FOR ESPECIFICADA

PARAMETROS DO THERMAL GOVERNOR TURBINE

NOME DA BARRA	MAQ. NO.	REGULACAO VELOCIDADE	FLYBALL GANHO	C.T.	SISTEMA DE CONTR. T1	T2	CS. TEMPO T3	TURBINA C.T.	TERMICA LIMITE (MW)
ANELBKV	1	0.0600	1.0000	0.0	0.2500	0.0	0.1000	0.1000	30.4000

- * NOTA: QUALQUER PARAMETRO NAO ESSENCIAL LIMITADO NOS DADOS *
- * DE ENTRADA ASSUME VALORES APROPRIADOS PARA UTILIZACAO NOS *
- * PROCESSOS DE CALCULO COMO MOSTRADOS ACIMA *
- * UM VALOR INDICADO COMO SENDO 9.999 OU 99.99 E NA REALIDADE *
- * 9999. *

DAOS DO MOTOR DE INDUCAO

PARAMETROS DO MOTOR

I	NOME	MTR. NO. DE	MVA	TAXA	INERCA	RESISTENCIAS (PU)	REACTANCIAS (P.U.)				C/C TRANS	TIPO	FATOR DE			
I	BARRA	NO. GAIOLAS	DADO	KV	KAS/KVA	ESTATOR	ROTOR	ESTATOR	ROTOR	MAGNETIZ.	J/C	TRANS	C.T. (SEG)	CARGA	GAIOLA	
1	AUXILIAR	1	1	0.280	0.0	4.0000	0.03300	0.03300	0.0800	0.1000	2.0000	2.0000	0.1752	0.16880	0	0.0

I	NOME	MOTOR	POT. ENTRADA DO MOTOR	ESCORREG. I			
I	BARRA	NO.	MW	NVAR	P.C.	I	
I	AUXILIAR	1	0.06000	0.0	100.000	I	
I	INICIALMENTE O MOTOR ACIMA ESTA DESCONECTADO DO SISTEMA						I

CARGAS SHUNT

I	BARRA	MEGAWATTS	MEGAVARS	I
1	GR900	6.04000	3.40000	1
1	GR9900	1.95000	1.21000	1

SISTEMA 1 CASC NO. 1

MAQ. REF. = NO. 1 NA BARRA ANEL88KV
 STEP DE INTEGRACAO (SEG) = 0.025000
 DURACAO DO ESTUDO (SEG) = 10.000000
 INTERVALO DE IMPRESSAO (SEG) = 0.050000
 ANGULO LIMITE DA MAQ.SINC. = 540.0GRAUS

ESPECIFICACAO DAS OPERACOES DE CHAVEAMENTO

TEMPO CHAVEAMENTO	CHAVEAMENTO IN/OUT	BARRA ENVIANDO	BARRA RECEBENDO	RESISTENCIA P.U.	REACTANCIA P.U.	SUSCEPTANCIA P.U.	TAP P.C.
0.0	OUT	GR9900	AUXILIAR	0.0	0.00001	0.0	0.0
0.0	IN	GR9900	AUXILIAR	0.0	0.00001	0.0	73.22
3.0000	OUT	GR9900	AUXILIAR	0.0	0.00001	0.0	73.22
3.0000	IN	GR9900	AUXILIAR	0.0	0.00001	0.0	0.0

OPERACOES DE CHAVEAMENTO DE MOTORES DE INDUCAO

NOME DA BARRA	MAQ NO.	OPERACOES DE CONTADORES (SEGS)	CONTACTOR SETTINGS	LOCK-OUT UNDER-SPEED
		OUT IN OUT IN	TENSAO DROP-OUT TENSAO PICK-UP DELAY TIME	TIMER SETTING (PCI)
AUXILIAR	1	0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0

CONDICIONES INICIALES

MAQUINAS SINCRONAS

NOME DA BARRA	MAQ NO.	ANG. ROTOP GRAUS	ESCORREG. ROTOP P.U.	POTENCIA MECANICA MW	POT. DE SAIDA ATIVA MW	DE REATIVA MVAR	TENSAO TERMINAL P.U.	CORRENTE TERMINAL P.U.	TENSAO DE CAMPO P.U.	CORRENTE DE CAMPO P.U.	FREQUENCIA GERADOR HZ
ANLELEKV	1	0.00	0.0	0.039	0.039	0.183	1.000	0.096	1.000	1.000	60.000

REFERENCIA A MAQUINA DESIGNADA PELO - * O ANGULO DESTA MAQUINA E RELATIVO AO SISTEMA ZERO

REGULADORES AUTOMATICOS DE TENSAO

NOME DA BARRA	MAQ NO.	CONTR. VOLTS	FILTRO SINAL	AMPLIFICADOR SINAL	FEEDBACK SINAL
ANLELEKV	1	1.000	1.000	1.170	0.0

CARGA DOS MOTORES DE INDUCAO

NOME DA BARRA	MAQ NO.	ESCORREG. ROTOP P.U.	POT. MEC. MW	POTENCIA DE ENTRADA ATIVA MW	DE REATIVA MVAR	TENSAO TERMINAL P.U.	CORRENTE TERMINAL P.U.	TORQUE (MJ) CARGA MOTOR
AUXILIAR	1	100.0000	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0000

TENSAO NAS BARRAS

BARRA	TENSAO	ANGULO	BARRA	TENSAO	ANGULO	BARRA	TENSAO	ANGULO	BARRA	TENSAO	ANGULO
ANLELEKV	1.000	0.00	GR900	0.970	-2.48	GR900	0.949	-4.15	AUXILIAR	0.949	-4.15

FLUXO DAS LINHAS

BARRA ENVIANDO		BARRA RECEBENDO		R P.U.	X P.U.	ENVIANDO-FIM				RECEBENDO-FIM			
						TENSAO P.U.	ANGULO	CORRENTE P.U.	POTENCIA P(MW)	TENSAO P.U.	ANGULO	CORRENTE P.U.	POTENCIA Q(MVAR)
ANLELEKV	GR900	GR900	AUXILIAR	0.03010	0.54180	1.000	0.0	0.096	3.02	0.970	-2.5	0.096	3.00
GR900	GR900	GR900	AUXILIAR	0.11280	1.46050	0.970	-2.5	0.024	1.76	0.949	-4.1	0.024	1.95
GR900	GR900	GR900	AUXILIAR	0.0	0.00001	0.949	-4.1	0.000	0.00	0.949	-4.1	0.000	0.00

LINHA DE IMPEDANCIA 0.0 0.00001 P.U. FOI LIGADA ENTRE AS BARRAS GR900 E AUXILIAR AO TEMPO DE 0.0 SEGUNDOS

LINHA DE IMPEDANCIA 0.0 0.00001 P.U. FOI LIGADA ENTRE AS BARRAS GR900 E AUXILIAR AO TEMPO DE 0.0 SEGUNDOS

MOTOR DE INDUCAO NO. 1 NA BARRA AUXILIAR SWITCHED IN AO TEMPO DE 0.0 SEGUNDOS

LINHA DE IMPEDANCIA 0.0 0.00001 P.U. FOI LIGADA ENTRE AS BARRAS GR900 E AUXILIAR AO TEMPO DE 0.0000 SEGUNDOS

LINHA DE IMPEDANCIA 0.0 0.00001 P.U. FOI LIGADA ENTRE AS BARRAS GR900 E AUXILIAR AO TEMPO DE 0.0000 SEGUNDOS

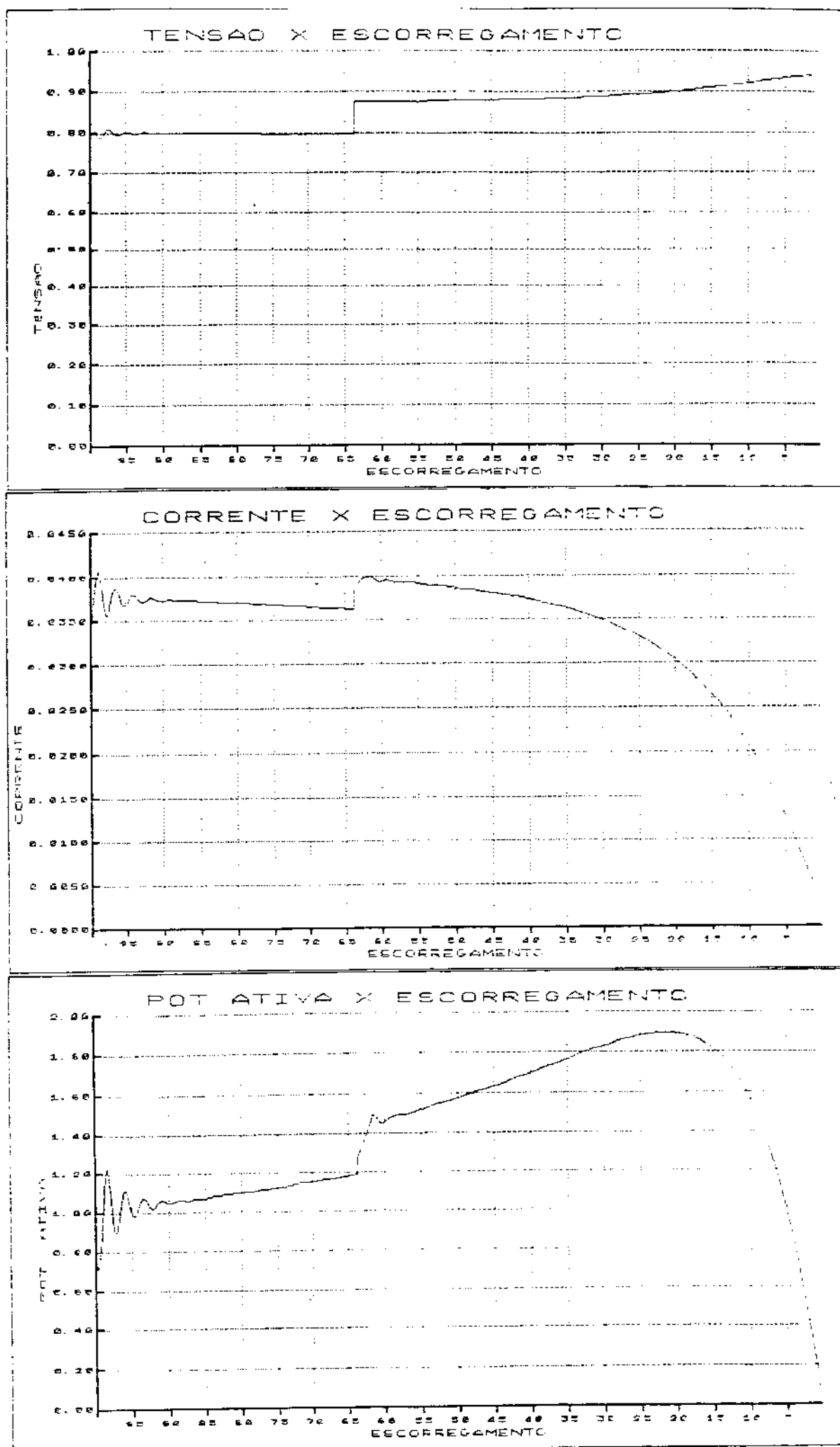


Figura 6.14 - Partida com resistores

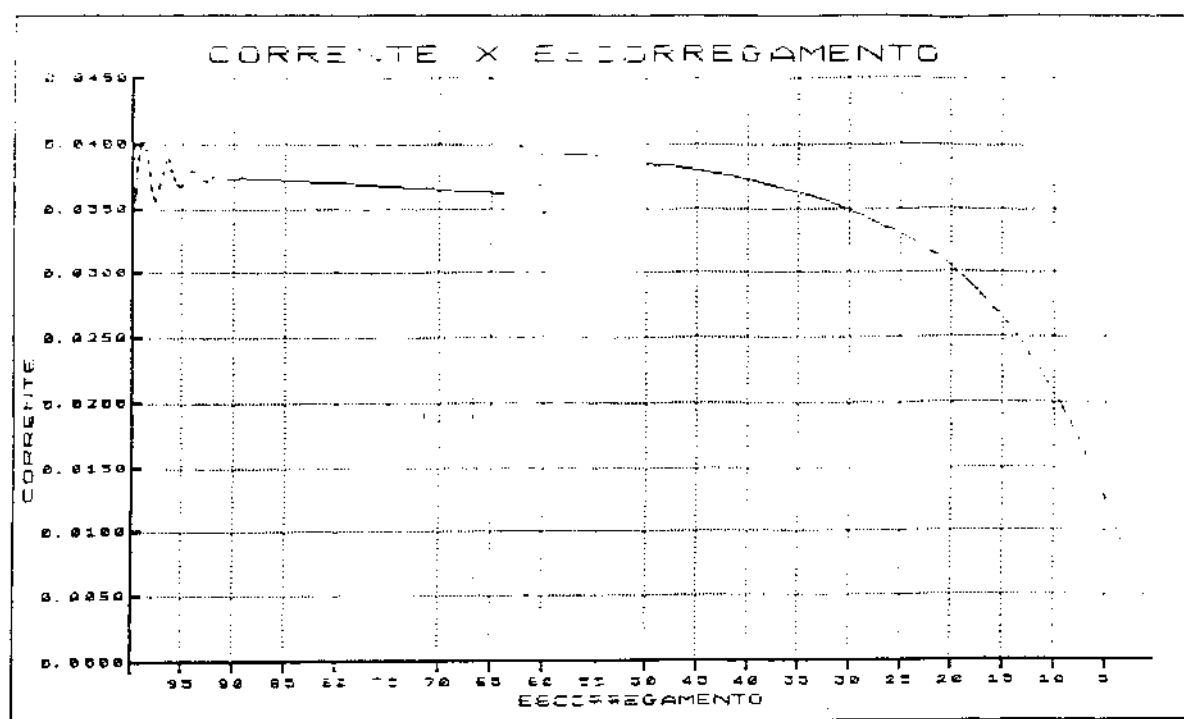


Figura 6.14 - Partida com resistores

6.6.5 - Caso 5 - Partida com reatância série

Verifica-se que a tensão aplicação no instante de partida aos terminais do motor é de 0,7085 [pu], a potência ativa 0,4585 [pu], a potência reativa 2,4345 [pu], e a corrente nos terminais do motor 0,0350 [pu]. Comparando com a partida direta, para uma mesma carga aplicada ao motor, tem-se uma redução da tensão aplicada devido a inserção de reatância em série como estator da máquina, reduzindo também a corrente solicitada do sistema de alimentação.

O tempo do acionamento até a máquina atingir o escorregamento de aproximadamente 6%, no ponto de operação é de 9,4 segundos, apresentando neste instante uma tensão terminal 0,9302 [pu], potência ativa 1,1732 [pu], potência reativa 0,6010 [pu], e corrente nos terminais do motor de 0,0148 [pu].

Verifica-se que alterações das condições iniciais de partida afetam o tempo de acionamento, e as condições do ponto de operação, comparativamente à partida direta.

SISTEMA ELETRICO DE POTENCIA - ESTUDO DE ESTABILIDADE TRANSITORIA

CARACTERISTICAS GERAIS DO SISTEMA

ANALISE DE PARTIDA DE MOTORES DE INDUCAO - SISTEMA CUSIPA
 ESTAGIO - II
 ESTUDO DA PARTIDA DO MOTOR DE 750 KW - COM REISTECIA EM SERIE
 UFU - DEE - CITEC - CIPRO
 FREQUENCIA DO SISTEMA = 60.00 HERTZ
 M.V.A. BASE = 100.0 M.V.A.

DADOS DO SISTEMA EM ESTADO PERMANENTE

DADOS DO FLUXO DE CARGA

I	BARRA	TENSÃO	ANG.	PW GER	PVAR GER	CARGA MW	CARGA MVAR	I
1	ANEL88KV	1.00000	0.0	8.03900	5.18270	0.0	0.0	1
1	GR900	0.57040	-2.48032	0.0	0.0	6.04000	3.40000	1
1	GR9900	0.94875	-4.11220	0.0	0.0	1.95000	1.21000	1
1	ALXILIAK	0.94875	-4.11220	0.0	0.0	0.0	0.0	1

OBS. OS DADOS ACIMA INCLUEM OS MOTORES DE INDUCAO.

DADOS DAS LINHAS

I	BARRA	BARRA	RESISTENCIA	REACTANCIA	SUSCEPTANCIA	TAP	I
1	EMISSORA	RECEPTORA	P.U.	P.U.	P.U.	P.C.	1
1	ANEL88KV	GR500	0.03010	0.54180	0.0	0.0	1
1	GR900	GR9900	0.13280	1.46050	0.0	0.0	1
1	GR9900	ALXILIAK	0.0	0.00001	0.0	0.0	1

OBS. IMPEDANCIA SHUNT DESIGNADA POR - *

DADES DO MOTOR DE INDUCAO

PARAMETROS DO MOTOR

1	NOME	MTB.	NO. DE	MVA	TAXA	INERCTA	RESISTENCIA	PLI	REACTANCIAS (P.U.)				D/C	TRANS	TIPC	FATOR DE	1
1	BARRA	NO.	CAIXAS	DADO	KV	KWS/KVA	ESTATOR	ROTOR	ESTATOR	ROTOR	MAGNLTIZ.	D/C	TRANS	C.T.(SEG)	CARGA	CAIXOLA	1
1	AUXILIAR 1	1	0.580	0.0	4.0000	0.03300	0.03300	0.0000	0.1000	2.0000	2.0800	0.1752	0.16880	0	0.0		1

1	NOME	MOTOR	POT. ENTRADA DO MOTOR	ESCORREG.
1	BARRA	NO.	Mh	PVAR
1	AUXILIAR	1	0.06000	0.0
1	INICIALMENTE O MOTOR ACIMA ESTA DESCONECTADO DO SISTEMA			

CARGAS SHUNT

1	BARRA	MEGAWATTS	MEGAVARS	1
1	GR500	6.04000	3.40000	1
1	GR5900	1.95000	1.21000	1

SISTEMA 1 CASE NO. 1

MAQ. REF. = NO. 1 NA BARRA ANEL38KV
 STEP DE INTEGRACAO (SEG) = 0.025000
 DURACAO DO ESTUDO (SEG) = 10.000000
 INTERVALO DE IMPRESSAO (SEG) = 0.050000
 ANGULO LIMITE DA MAQ.SINC. = 540.0GRAUS

ESPECIFICACAO DAS OPERACOES DE CHAVEAMENTO

TEMPO	CHAVEAMENTO	BARRA	BARRA	RESISTENCIA	REACTANCIA	SUSCEPTANCIA	TAP
CHAVEAMENTO	IN/OUT	ENVIANDO	RECEBENDO	P.U.	P.U.	P.U.	P.C.
0.0	OUT	GR5500	AUXILIAR	0.0	0.00001	0.0	0.0
0.0	IN	GR5500	AUXILIAR	5.00000	0.0	0.0	0.0
5.0000	OUT	GR5500	AUXILIAR	5.00000	0.0	0.0	0.0
5.0000	IN	GR5500	AUXILIAR	0.0	0.00001	0.0	0.0

OPERACOES DE CHAVEAMENTO DE MOTORES DE INDUCAO

NOME DA BARRA	MAC NO.	OPERACOES DE CONTACTORES (SEGS)			CONTATOR SETTINGS			LOCK-OUT TIMEK	UNDER-SPEED SETTING(PCT)
		OUT	IN	OUT	TENSAG PROF-EGT	TENSAG PICK-UP	DELAY TIME		
AUXILIAR	1		0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

LINHAS MONITORADAS

I	BARRA	BARRA	RESISTENCIA	REACTANCIA	SUSCEPTANCIA	IAP	I
I	EMISSORA	RECEPIDORA	P.U.	P.U.	P.U.	P.C.	I
I	ANELEPRKV	GR900	0.00010	0.54180	0.0	0.0	I
I	GR900	GR9900	0.11280	1.46050	0.0	0.0	I
I	GR9900	AUXILIAR	0.0	0.00001	0.0	0.0	I

DADOS DAS MAQUINAS SINCRONAS

PARAMETROS DAS MAQUINAS

I	BARRA	MAQUINA	MVA	CONST.	(----- REACTANCIAS (P.U.) -----)					RESIST.(----- C/C TCS (SEGS) -----)					FATOR	I				
I	NOME	NO	MODEL	PASE	INFER.	TRANSITORIA	SINCRONA	SURTRANSITORIA	PUT	ARM.	TRANSITORIA	SUBTRANSITORIA	SATURACAO		I					
I						CADO	KWSKVA	EIXO-D	EIXO-Q	EIXO-D	EIXO-Q	EIXO-D	EIXO-Q	IER (P.U.)	EIXO-D	EIXO-Q	EIXO-D	EIXO-Q		I
I	ANELEPRKV	1	1	100.00	INFIN.	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0	0.0001	INFIN.	INFIN.	0.0	0.0	0.0		I

I	NOME DA	MAC	POTENCIA	DE SAIDA DA	MAQUINA	FATOR	I
I	BARRA	NO.	Mh	MVAR	AMORTECIMENTO		I
I	ANELEPRKV	1	8.03900	5.18270	0.0		I

DADOS DO REGULADOR AUTOMATICO DE TENSÃO

NOME DA	MC	AVR	FILTRO	REG.	REG.	CS.T.	(---)	LIMITE	REG.	(---)	EXCITADOR	F/BK	F/BK	CS.T.	LIMITE	EXCITADOR	SATUR.	(SE)
BARRA	NO	TIPO	C.T.	GANHO	TA	TB	MAX	MIN	TAXA	GANHO	C.T.	GANHO	TE	TD	MAX	MIN	.75MAX	MAX
ANELEPRKV	1	1	0.0	400.00	0.010	0.0	7.300	7.300	99.99	1.000	0.030	1.000	1.000	0.0	3.920	0.0	0.500	0.860

REG. AUT. TENSÃO CONTROLA BARRA LEGAL EXCETO ONDE OUTRA FOR ESPECIFICADA

PARAMETROS DO THERMAL GOVERNOR TURBINE

NOME DA	MAC.	REGULACAO	FLYBALL	SISTEMA DE CONTR.	CS.TEMPO	TURBINA	TERMICA
BARRA	NO.	VELOCIDADE	GANHO C.T.	T1 T2 T3	C.T.	LIMITE(MW)	
ANILPRKV	1	0.0600	1.0000 0.0	0.2500 0.0 0.1000	0.3500	30.4000	

* NOTA: QUALQUER PARAMETRO NAO ESSENCIAL OMITIDO NOS DADOS *
 * DE ENTRADA ASSUME VALORES APROPRIADOS PARA UTILIZACAO KLS *
 * PROCESSOS DE CALCULO COMO MOSTRADO ACIMA. *
 * UM VALOR INDICADO COMO SENDO 9.999 OU 99.99 E NA REALIDADE *
 * 9999. *

CONDICÕES INICIAIS

MAQUINAS SINCRONAS

NOME DA BARRA	MAQ. NO.	ANG. POT. GRAUS	ESCAPREG. ROTOR P.U.	POTENCIA MECANICA MW	POT. ATIVA MW	DE SAIDA REATIVA MVAR	TENSÃO TERMINAL P.U.	CORRENTE TERMINAL P.U.	TENSÃO DE CAMPO P.U.	CORRENTE DE CAMPO P.U.	FREQUENCIA GERADOR HZ
ANELEBKV	1 *	0.00	0.0	8.039	8.039	5.183	1.000	0.096	1.000	1.000	60.000

REFERENCIA A MAQUINA DESIGNADA PELO - * O ANGULO DESTA MAQUINA E RELATIVO AO SISTEMA ZERO

REGULADORES AUTOMATICOS DE TENSÃO

NOME DA MAQ. BARRA	NO. CONTR.	BARRA VOLTIS	1/P FILTRO SINAL	AMPLIFICADOR SINAL	FEEDBACK SINAL
ANELEBKV	1	1.000	1.000	1.170	0.0

CARGA DOS MOTORES DE INDUCAO

NOME DA MAQ. BARRA	NO.	ESCAPREG. ROTOR P.U.	POT. MEC. MW	POTENCIA ATIVA MW	DE ENTRADA REATIVA MVAR	TENSÃO TERMINAL P.U.	CORRENTE TERMINAL P.U.	TORQUE CARGA	(MJ) MOTOR
AUXILIAR	1	100.0000	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0598	0.0

TENSÃO NAS BARRAS

BARRA	TENSÃO	ANGULO	BARRA	TENSÃO	ANGULO	BARRA	TENSÃO	ANGULO	BARRA	TENSÃO	ANGULO
ANELEBKV	1.000	0.00	GR900	0.970	-2.48	GR9900	0.949	-4.15	AUXILIAR	0.949	-4.15

FLUXO DAS LINHAS

BARRA ENVIANDO		BARRA RECEBENDO	R P.U.	X P.U.	ENVIANDO-FIM				RECEBENDO-FIM			
					TENSÃO P.U.	ANGULO	CORRENTE P.U.	POTENCIA P(MW) Q(MVAR)	TENSÃO P.U.	ANGULO	CORRENTE P.U.	POTENCIA P(MW) Q(MVAR)
ANELEBKV		GR900	0.03010	0.54180	1.000	0.0	0.096	8.02 5.19	0.970	-2.5	0.096	8.00 4.69
GR900		GR9900	0.13280	1.46050	0.970	-2.5	0.024	1.96 1.30	0.949	-4.1	0.024	1.95 1.21
GR9900		AUXILIAR	0.0	0.00001	0.949	-4.1	0.000	0.00 0.00	0.949	-4.1	0.000	0.00 0.00

LINHA DE IMPECANCIA 0.0 +J 0.00001 P.U.FOI DESLIGADA , ENTRE AS BARRAS GR900 E AUXILIAR AO TEMPO DE 0.0 SEGUNDOS

LINHA DE IMPEDANCIA 5.00000 +J 0.0 P.U. FOI LIGADA ENTRE A BARRAS GR9900 E AUXILIAR AO TEMPO DE 0.0 SEGUNDOS

MOTOR DE INDUCAO NO. 1 NA BARRA AUXILIAR SWITCHED 1A AO TEMPO DE 0.0 SEGUNDOS

LINHA DE IMPECANCIA 5.00000 +J 0.0 P.U.FOI DESLIGADA , ENTRE AS BARRAS GR9900 E AUXILIAR AO TEMPO DE 5.0000 SEGUNDOS

LINHA DE IMPEDANCIA 0.0 +J 0.00001 P.U. FOI LIGADA ENTRE A BARRAS GR900 E AUXILIAR AO TEMPO DE 5.0000 SEGUNDOS

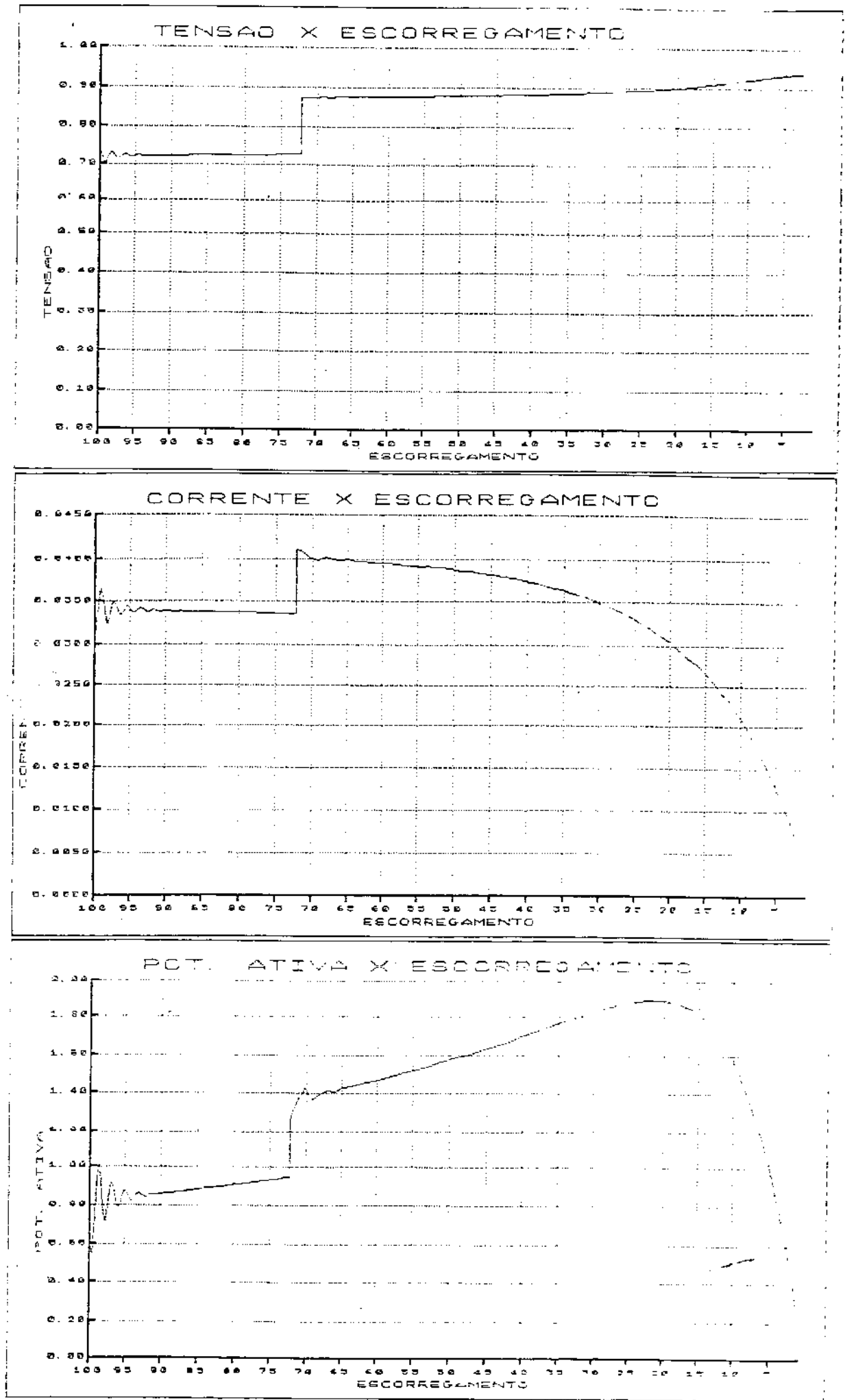


Figura 6.15 - Partida com reatores

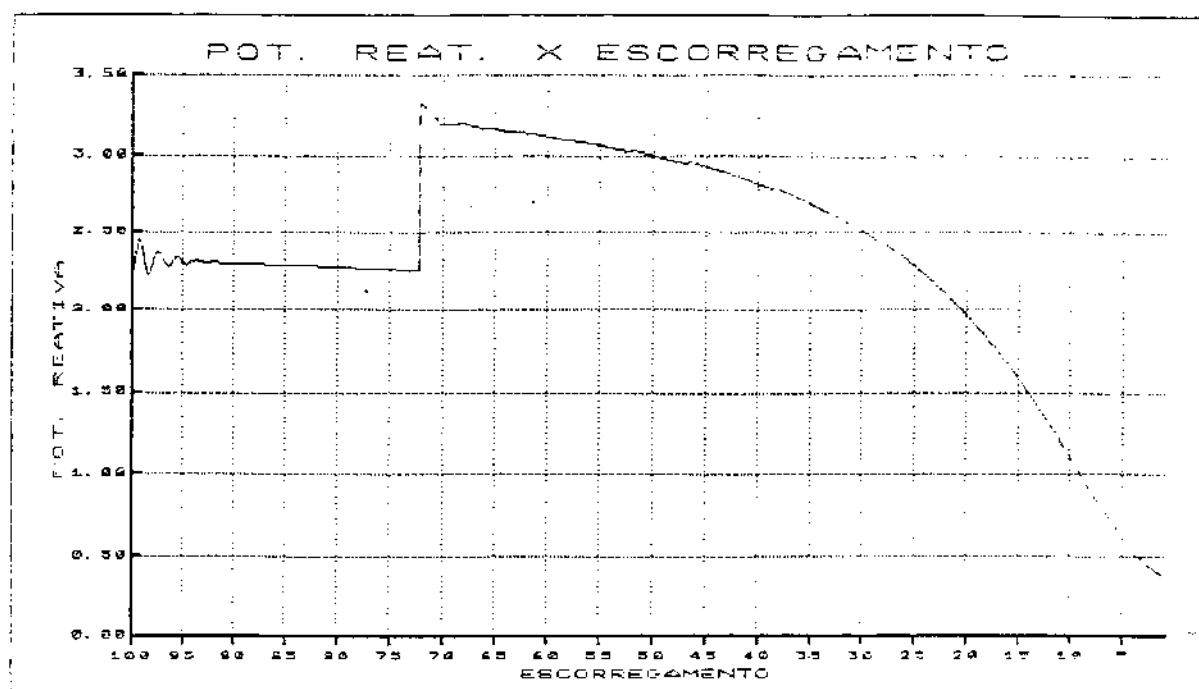


Figura 6.15 - Partida com reatores

6.6.6 - Caso 6 - Partida com um único capacitor

Verifica-se que a tensão aplicada no instante de partida aos terminais do motor é sustentada em 1,0495 [pu], a potência ativa é de 1,0059 [pu], a potência reativa 5,3415 [pu], a corrente nos terminais do motor é de 0,0518 [pu].

O tempo do acionamento até a máquina atingir o escorregamento de aproximadamente 6%, no ponto de operação, é de 5,1 segundos, apresentando neste instante uma tensão terminal de 1,1448 [pu], potência ativa 1,7404 [pu], potência reativa de 1,0869 [pu], e corrente terminal de 0,0179 [pu].

Verifica-se que o acionamento utilizando capacitor de partida, para mesma carga aplicada apresenta um tempo menor de acionamento comparativamente as partidas anteriores, inclusive a partida direta, a tensão sustentada durante todo o período de partida, apresenta uma solicitação menor do sistema de alimentação, porém provoca uma pequena sobre elevação de tensão em regime nos terminais do motor.

SISTEMA ELETRICO DE POTENCIA - ESTUDO DE ESTABILIDADE TRANSITORIA

CARACTERISTICAS GERAIS DO SISTEMA

ANALISE DE PARTIDA DE MOTORES DE INDUCAO - SISTEMA COSIPA
ESTAGIO - II
ESTUDO DA PARTIDA DO MOTOR DE 750 KW - COM REATANCIA SERIE
UFU - DEE - CETEC - CEPPD
FREQUENCIA DO SISTEMA = 60.00 HERTZ
M.V.A. BASE = 100.0 M.V.A.

DADOS DO SISTEMA EM ESTADO PERMANENTE

DADOS DO FLUXO DE CARGA

I	BARRA	TENSÃO	ANG.	MW GER	MVAR GER	CARGA MW	CARGA MVAR	I
I	ANEL88KV	1.00000	0.0	8.03500	5.18270	0.0	0.0	I
I	GR900	0.97040	-2.48032	0.0	0.0	6.04000	3.49000	I
I	GR9900	0.94875	-4.11220	0.0	0.0	1.95000	1.21000	I
I	AUXILIAR	0.94875	-4.11220	0.0	0.0	0.0	0.0	I

OBS. OS DADOS ACIMA INCLUEM OS MOTORES DE INDUCAO.

DADOS DAS LINHAS

I	BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	RESISTENCIA P.U.	REATANCIA P.U.	SUSCEPTANCIA P.U.	TAP P.C.	I
I	ANEL88KV	GR900	0.03010	0.54180	0.0	0.0	I
I	GR900	GR9900	0.13280	1.46050	0.0	0.0	I
I	GR9900	AUXILIAR	0.0	0.00001	0.0	0.0	I

OBS. IMPEDANCIA SHUNT DESIGNADA POR - *

LINHAS MONITORADAS

1	BARRA	BARRA	RESISTENCIA	REACTANCIA	SUSCEPTANCIA	TAP	1
1	EMISSORA	RECEPTORA	P.U.	P.U.	P.U.	P.C.	1
1	ANEL88KV	GR900	0.03010	0.54180	0.0	0.0	1
1	GR900	GR9500	0.13280	1.46050	0.0	0.0	1
1	GR9900	AUXILIAR	0.0	0.00001	0.0	0.0	1

DADOS DAS MAQUINAS SINCRONAS

PARAMETROS DAS MAQUINAS

1	BARRA	MAQUINA	MVA	CONST.	(-----	REACTANCIAS (P.U.)	(-----	RESIST.	(-----	O/C	TCS (SEGS)	(-----	FATOR					
1	NOME	NO	MODEL	BASE	INFR.	TRANSITORIA	SINCRONA	SUBTRANSITORIA	POT-	ARM.	TRANSITORIA	SUBTRANSITORIA	SATURACAO					
1				DADO	KHSXVA	FIXO-D	FIXO-Q	FIXO-D	FIXO-Q	EIXO-D	EIXO-Q	IER (P.U.)	EIXO-D	EIXO-Q	EIXO-D	EIXO-Q		
1	ANEL88KV	1	1	100.00	INFIN.	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0	0.0001	INFIN.	INFIN.	0.0	0.0	0.0

1	NOME DA	MAC	POTENCIA DE SAIDA DA MAQUINA	FATOR
1	BARRA	NO.	MW	AMORTECIMENTO
1	ANELESKV	1	8.03900	5.18270
				0.0

DADOS DO REGULADOR AUTOMATICO DE TENSAO

NOME DA	PO	AVR	FILTRO	REG.	REG.	CS.T.	(---LIMITE PEG.---		EXCITADOR	F/BK	F/BK	CS.T.	LIMITE	EXCITADOR	SATUR.(SE)			
BARRA	NO	TIPO	C.T.	GANHO	TA	TB	MAX	MIN	TAXA	GANHO	C.T.	GANHO	TF	TD	MAX	MIN	.75MAX	MAX
ANEL88KV	1	1	0.0	400.00	0.010	0.0	7.300	-7.300	99.99	1.000	0.030	1.000	1.000	0.0	3.920	0.0	0.500	0.860

REG.ALT.TENSAC CONTROLA BARRA LOCAL EXCETO ONDE OUTRA FOR ESPECIFICACAO

PARAMETROS DO THERMAL GOVERNOR TURBINE

Nome da Barra	Maq. No.	Regulaco Velocidade	FLYBALL GANHO	C.T.	SISTEMA DE CONTR. T1	T2	CS. TEMPO T3	TURBINA C.T.	TERMICA LIMITE (MW)
ANEL88KV	1	0.0100	1.0000	0.0	0.2500	0.0	0.1000	0.3500	30.4000

* NOTA: QUALQUER PARAMETRO NAO ESSENCIAL UNIFICADO DOS DADOS *
 * DE ENTRADA ASSUME VALORES APROPRIADOS PARA UTILIZACAO NOS *
 * PROCESSOS DE CALCULO COMO MOSTRADO ACIMA. *
 * UM VALOR INDICADO COMO SENDO 9.999 OU 99.99 E NA REALIDADE *
 * 9999. *

DADOS DO MOTOR DE INDUCAO

PARAMETROS DO MOTOR

1	NOME	MTR. NO.	NO. DE	MVA	TAXA	INERCIA	RESISTENCIAS (P.U.)	REACTANCIAS (P.U.)	U/C TRANS	TIPO	FATOR DE					
1	BARRA	NO.	GAIOLAS	DADO	KV	KWS/KVA	ESTATOR	ROTOR	ESTATOR	ROTOR	MAGNETIC.	0/C	TRANS	C.T. (SEG)	CARGA	GAIOLA
1	AUXILIAR	1	1	0.880	0.0	4.0000	0.03300	0.03300	0.0800	0.1000	2.0000	2.0800	0.1752	0.16880	0	0.0

1	NOME	MOTOR	PCT. ENTRADA DO MOTOR	ESCURTEG.	1
1	BARRA	NO.	MW	MVAR	P.C.
1	AUXILIAR	1	0.06000	0.0	100.000
1	INICIALMENTE O MOTOR ACIMA ESTA DESCONECTADO DO SISTEMA				

CARGAS SHUNT

1	BARRA	MEGAWATTS	MEGAVARS	1
1	GR900	6.04000	3.40000	1
1	GR9900	1.95000	1.21000	1

SISTEMA 1 CASE NO. 1

MAQ. REF. = NO. 1 NA BARRA ANEL38KV
 STEP OF INTEGRACAO (SEG) = 0.025000
 DURACAO DO ESTUDO (SEG) = 10.000000
 INTERVALO DE IMPRESSAO (SEG) = 0.050000
 ANGULO LIMITE DA MAQ-SINC. = 540.0 GRAUS

ESPECIFICACAO DAS OPERACOES DE CHAVEAMENTO

TEMPO	CHAVEAMENTO	BARRA	BARRA	RESISTENCIA	REACTANCIA	SUSCEPTANCIA	TAP
CHAVEAMENTO	IN/OUT	ENVIANDO	RECEBENDO	P.U.	P.U.	P.U.	P.C.
0.0	OUT	GR9900	AUXILIAR	0.0	0.00001	0.0	0.0
0.0	IN	GR9900	AUXILIAR	0.0	0.00000	0.0	0.0
5.0000	OUT	GR9900	AUXILIAR	0.0	0.00000	0.0	0.0
5.0000	IN	GR9900	AUXILIAR	0.0	0.00001	0.0	0.0

OPERACOES DE CHAVEAMENTO DE MOTORES DE INDUCAO

NOME DA BARRA	MAQ Nº.	OPERACOES DE CONTADORES (SEGS)				CONTACTOR SETTINGS			LOCK-OUT TIMER	UNDER-SPEED SETTING(PC)
		OUT	IN	OUT	IN	TENSAO DROP-OUT	TENSAO PICK-UP	DELAY TIME		
AUXILIAR	1		0.0			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

CONDICOES INICIAIS

MAQUINAS SINCRONAS

NOME DA BARRA	MAQ NO.	ANG. ROTOR GRADS	ESCORREG. ROTCP P.U.	POTENCIA MECANICA MW	POT. DE SAIDA ATIVA MW	POT. DE SAIDA REATIVA MVAR	TENSAO TERMINAL P.U.	CORRENTE TERMINAL P.U.	TENSAO DE CAMPO P.U.	CORRENTE DE CAMPO P.U.	FREQUENCIA GERADOR HZ
ANFLR8KV	1 *	0.00	0.0	9.039	8.035	5.183	1.000	0.096	1.000	1.000	60.000

REFERENCIA A MAQUINA DESIGNADA PELO - * O ANGULO DESTA MAQUINA E RELATIVO AO SISTEMA ZERO

REGULADORES AUTOMATICOS DE TENSAO

NOME DA BARRA	MAQ NO.	BARRA CONTR.	T/P FILTRO VOLTS	AMPLIFICADOR SINAL	FEEDBACK SINAL
ANFLR8KV	1	1.000	1.000	1.170	0.0

CARGA DOS MOTORES DE INDUCAO

NOME BARRA	MAQ NO.	ESCORREG. P.C.	POT. MEC. MW	POTENCIA DE ENTRADA ATIVA MW	POTENCIA DE ENTRADA REATIVA MVAR	TENSAO TERMINAL P.U.	CORRENTE TERMINAL P.U.	TORQUE (MJ) CARGA MOTOR
AUXILIAR	1	100.0000	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0598 0.0

TENSAO NAS BARRAS

BARRA	TENSAO	ANGULO	BARRA	TENSAO	ANGULO	BARRA	TENSAO	ANGULO	BARRA	TENSAO	ANGULO
ANFLR8KV	1.000	0.00	GR900	0.970	-2.48	GR9900	0.949	-4.15	AUXILIAR	0.949	-4.15

FLUXO DAS LINHAS

BARRA ENVIANDO		BARRA RECEBENDO	R P.U.	X P.U.	TENSAO ENVIANDO-FIN				RECEBENDO-FIN				
					TENSAO P.U.	ANGULO	CORRENTE P.U.	POTENCIA P(MW)	TENSAO P.U.	ANGULO	CORRENTE P.U.	POTENCIA P(MW)	
ANFLR8KV	GR900		0.03010	0.54180	1.000	0.0	0.096	8.02	0.970	-2.5	0.096	8.00	4.65
GR900	GR9900		0.13280	1.46050	0.970	-2.5	0.024	1.96	0.949	-4.1	0.024	1.95	1.21
GR9900	AUXILIAR		0.0	0.00001	0.949	-4.1	0.000	0.00	0.949	-4.1	0.000	0.00	0.00

LINHA DE IMPEDANCIA 0.0 +J 0.00001 P.U. FOI DESLIGADA , ENTRE AS BARRAS GR9900 E AUXILIAR AO TEMPO DE 0.0 SEGUNDOS
 LINHA DE IMPEDANCIA 0.0 +J 5.00000P.U. FOI LIGADA ENTRE A BARRAS GR9900 E AUXILIAR AO TEMPO DE 0.0 SEGUNDOS
 MOTOR DE INDUCAO NO. 1 NA BARRA AUXILIAR SWITCHED IN AO TEMPO DE 0.0 SEGUNDOS

LINHA DE IMPEDANCIA 0.0 +J 5.00000 P.U. FOI DESLIGADA , ENTRE AS BARRAS GR9900 E AUXILIAR AO TEMPO DE 5.0000 SEGUNDOS
 LINHA DE IMPEDANCIA 0.0 +J 0.00001P.U. FOI LIGADA ENTRE A BARRAS GR9900 E AUXILIAR AO TEMPO DE 5.0000 SEGUNDOS

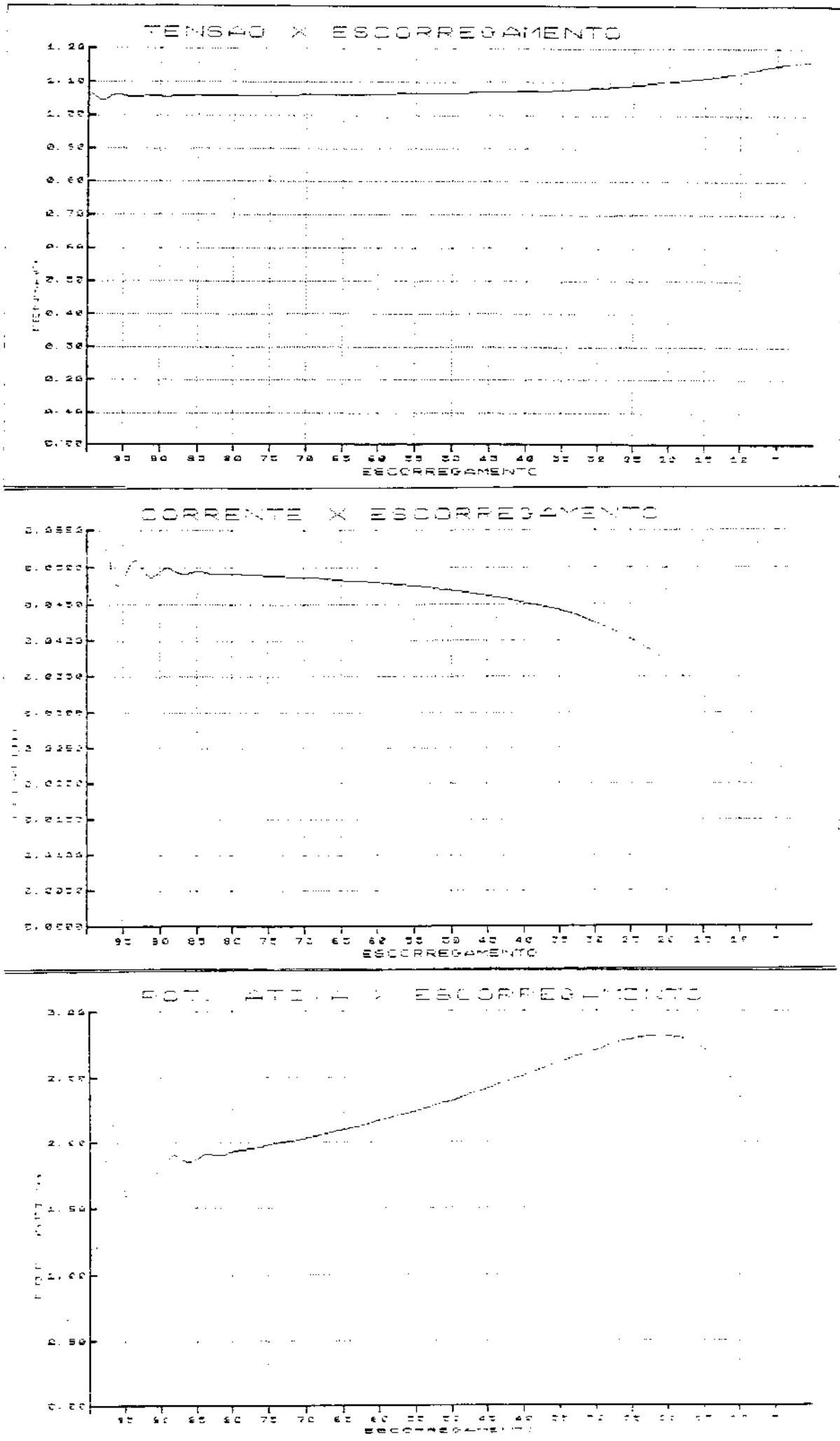


Figura 6.16 - Partida com um único capacitor

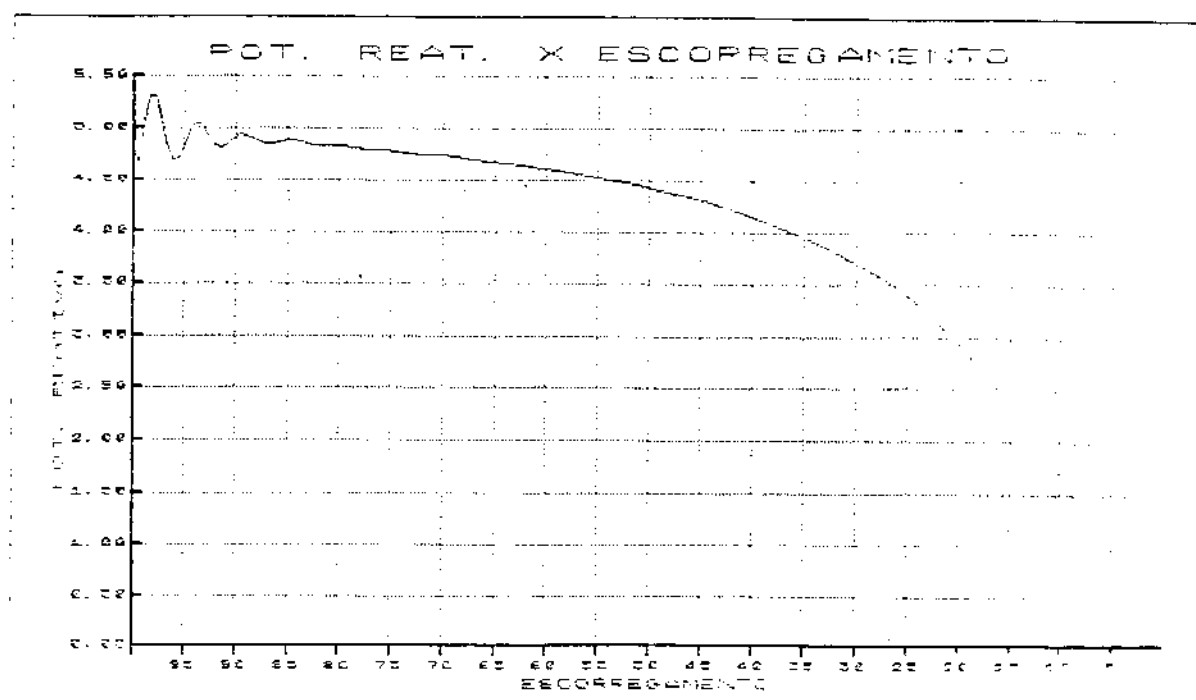


Figura 6.16 - Partida com um único capacitor

6.6.7 - Caso 7 - Partida com vários capacitores

Verifica-se que a tensão aplicada no instante de partida aos terminais do motor é sustentada em 0,9312 [pu], a potência ativa é de 0,7919 [pu], a potência reativa 4,2051 [pu], a corrente nos terminais do motor é de 0,0460 [pu]. Com o chaveamento dos vários capacitores durante o período de partida, consegue-se evitar a sobre elevação de tensão nos terminais da máquina em regime permanente.

O tempo do acionamento até a máquina atingir o escorregamento de aproximadamente 6%, no ponto de operação, é de 7,3 segundos, apresentando neste instante uma tensão terminal de 0,9453 [pu], potência ativa 1,1952 [pu], potência reativa 0,7351 [pu], e corrente terminal de 0,0148 [pu].

Verifica-se que o acionamento utilizando vários capacitores de partida, para a mesma carga aplicada ao motor apresenta um tempo menor de acionamento comparativamente as partidas anteriores, inclusive a partida direta, a tensão sustentada durante todo o período de partida, apresenta uma solicitação menor do sistema de alimentação, evitando o efeito da sobre elevação de tensão nos terminais através do chaveamento dos capacitores.

የጥገናው ዓላማ ማሳካትና የጥገናው ዋጋ ማሳጠፍ ነው።

ANALISE DE PARTIDA DE MOTORES DE INDUCAD - SISTEMA COSIPA
ESTAGIO - II
ESTUDO DA PARTIDA DO MOTOR DE 750 KW - PARTIDA COM CAPACITOR
UFU - DFE - CFIIC - CEPRO
FREQUENCIA DO SISTEMA = 60.00 HERTZ
M.V.A. BASE = 100.00 M.V.A.

Abstract

CADOS ON FLUXE DE CARGA

	BARRA	TENSÃO	ÂNG.	MW GER	MVAR GER	CARGA MW	CARGA MVAR
1	ANFLRBRKV	1.00000	0.0	8.03900	5.18270	0.0	0.0
1	GR900	0.67040	-2.48032	0.0	0.0	0.04000	3.40000
1	GR9900	0.94675	-4.11220	0.0	0.0	1.95000	1.21000

Obs. Os dados acima incluem os motores de indução.

CADOS DAS LINHAS

I	BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	RESISTENCIA P.U.	REACTANCIA P.U.	SUSCEPTANCIA P.U.	TAP P.C.
1	ANEL 88KV	GR900	0.03010	0.54180	0.0	0.0
1	GR900	GR9500	0.13280	1.46050	0.0	0.0

Obs. IMPEDANCIA SHUNT DESIGNADA POR - *

CONDICÕES INICIAIS

MAQUINAS SINCRONAS

NOME DA BARRA	MAC NO.	ANG. ROTOR GRAUS	FSCORREG. POTER P.U.	POTENCIA MECANICA MW	POT. DE SAIDA ATIVA MW	DESAIDA REATIVA MVAR	TENSÃO TERMINAL P.U.	CORRENTE TERMINAL P.U.	TENSÃO DE CAMPO P.U.	CORRENTE DE CAMPO P.U.	FREQUENCIA GERADOR HZ
ANELPRKV	1	0.00	0.0	0.000	0.000	5.183	1.000	0.096	1.000	1.000	60.000

REFERENCIA A MAQUINA DESIGNADA PELO - * O ANGULO DESA MAQUINA E RELATIVO AO SISTEMA ZERO

REGULADORES AUTOMATICOS DE TENSÃO

NOME DA BARRA	MAC NO.	BARRA NO.	CONTR. VOLTS	I/P FILTRO SINAL	AMPLIFICADOR SINAL	FEEDBACK SINAL
ANELPRKV	1	1.000	1.000	1.170	0.0	

CARGA DOS MOTORES DE INDUÇÃO

NOME BARRA	MAC NO.	FSCORREG. POTER P.U.	POT. MEC. MW	POTENCIA DE ENTRADA ATIVA MW	DE ENTRADA REATIVA MVAR	TENSÃO TERMINAL P.U.	CORRENTE TERMINAL P.U.	TORQUE (MJ) CARGA MOTOR
GR9900	1	100.0000	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0598

TENSÃO NAS BARRAS

BARRA	TENSÃO	ANGULO	BARRA	TENSÃO	ANGULO	BARRA	TENSÃO	ANGULO	BARRA	TENSÃO	ANGULO
ANELPRKV	1.000	0.00	GR9900	0.970	-2.48	GR9900	0.949	-4.15			

FLUXO DAS LINHAS

BARRA ENVIANDO		BARRA RECEBENDO		ENVIANDO-FIN					RECEBENDO-FIN				
				TENSÃO P.U.	ANGULO	CORRENTE P.U.	POTENCIA P(MW)	POTENCIA Q(MVAR)	TENSÃO P.U.	ANGULO	CORRENTE P.U.	POTENCIA P(MW)	POTENCIA Q(MVAR)
ANELPRKV	GR9900	0.03030	0.54160	1.000	0.0	0.096	5.07	5.19	0.970	-2.5	0.096	8.00	4.65
GR9900	GR9900	0.13280	1.42050	0.970	-2.5	0.024	1.95	1.30	0.949	-4.1	0.024	1.95	1.21

MOTOR DE INDUÇÃO NO. 1 NA BARRA GR9900 SWITCHED IN AO TEMPO DE 0.0 SEGUNDOS

DADOS DO MOTOR DE INDUCAO

PARAMETROS DO MOTOR

1	NOME	MTK.	NO. DE	KVA	TAXA	INERÇIA	RESISTENCIAS (PU)	REACTANCIAS (P.U.)				O/C TRANS	TPO	FATOR DE		
1	BARRA	NO.	GAIOLAS DADO	KV	KWS/KVA	ESTATOR	ROTOR	ESTATOR	ROTOR	MAGNETIZ.	O/C	TRANS	C.1. (SEG)	CARGA GAIOLA	1	
1	GR9900	1	1	0.880	0.0	4.0000	0.03300	0.03300	0.0800	0.1000	2.0000	2.0800	0.1752	0.1680	0	0.0

1	NOME	MOTOR	PGT.	ENTRADA DO MOTOR	ESQUEM.	1	
1	BARRA	NO.	MM	MVAR	P.C.	1	
1	GR9900	1	0.06000	0.0	100.000	1	
1	INICIALMENTE O MOTOR ACIMA ESTA DESCONECTADO DO SISTEMA						1

CARGAS SHUNT

1	BARRA	MEGAWATTS	MEGAVARS	1
1	GR900	6.04000	3.40000	1
1	GR9900	1.95000	1.21000	1

SISTEMA 1 CASO NO. 1

MAC. REF. = NO. 1 NA BARRA ANCL88KV
 STEP DE INTEGRACAO (SEGI) = 0.025000
 DURACAO DO ESTILO (SEGI) = 10.000000
 INTERVALO DE IMPRESSAO (SEGI) = 0.050000
 ANGULO LIMITE DA MAC. SING. = 540.000000

ESPECIFICACAO DAS OPERACOES DE CHAVLAMENTO

TEMPO	CHAVEAMENTO	BARRA	BARRA	RESISTENCIA	REACTANCIA	SUSCEPTANCIA	TAP
CHAVAMENTO	IN/OUT	ENVIADO	RECEBENDO	P.U.	P.U.	P.U.	P.C.
0.0	IN	GR9900	*	0.0	-25.00000		
1.0000	OUT	GR9900	*	0.0	-25.00000		
1.0000	IN	GR9900	*	0.0	-70.00000		
2.0000	OUT	GR9900	*	0.0	-70.00000		
2.0000	IN	GR9900	*	0.0	-120.00000		

OPERACOES DE CHAVAMENTO DE MOTORES DE INDUCAO

NOME DA BARRA	MAC NO.	OPERACOES DE CONTATORES (SEGS)				CONTATOR SETTINGS				
		OUT	IN	OUT	IN	TENSAO DROP-OUT	TENSAO PICK-UP	DELAY TIME	LOCK-OUT TIMER	UNDER-SPEED SETTING(PC)
GR9900	1		0.0			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

LINHAS MONITORADAS

1	BARRA	BARRA	RESISTENCIA	REACTANCIA	SUSCEPTANCIA	TAP	1
1	EMISSORA	RECEPTORA	P.U.	P.U.	P.U.	P.C.	1
1	ANEL88KV	GR500	0.03010	0.54180	0.0	0.0	1
1	GR500	GR5000	0.13280	1.46050	0.0	0.0	1

DADOS DAS MAQUINAS SINCRONAS

PARAMETROS DAS MAQUINAS

1	BARRA	MAQUINA	MVA	CONST.	(-----) REACTANCIAS (P.U.) (-----)					RESIST.(-----) O/C TCS (SEGS) (---)				FATOR	1				
1	NOME	NC	MODEL	PASE	INER.	TRANSITORIA	SINCRONA	SUBTRANSITORIA	POT-	ARM.	TRANSITORIA	SUBTRANSITORIA	SATURACAO		1				
1				DADO	KWSKVA	EIXO-D	EIXO-Q	EIXO-D	FIXO-Q	EIXO-D	FIXO-Q	IER	(P.U.)	EIXO-D	FIXO-Q	EIXO-D	FIXO-Q		1
1	ANEL88KV	1	1	100.00	INFIN.	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0	0.0001	INFIN.	INFIN.	0.0	0.0	0.0	1

1	ACMF DA	MAC	POTENCIA	DE SAIDA DA	MAQUINA	FATOR	1
1	BARRA	NC.	MW	MVAR	AMORTECIMENTO	1	1
1	ANEL88KV	1	8.03900	5.18270	0.0	1	1

DADOS DO REGULADOR AUTOMATICO DE TENSÃO

ACMF DA	MD	AVR	FILTRO	REG.	REC.	CS.T.	(---)	LIMITE	REG.	(---)	EXCITADOR	F/BK	F/BK	CS.T.	LIMITE	EXCITADOR	SATUR.	(SE)
BARRA	NC	TIPC	C.T.	Ganho	TA	TB	MAX	MIN	TAXA	Ganho	C.T.	Ganho	TF	TD	MAX	MIN	.75MAX	MAX
ANEL88KV	1	1	0.0	400.00	0.010	0.0	7.200	7.300	55.99	1.000	0.030	1.000	1.000	0.0	3.920	0.0	0.500	0.860

REG. AUT. TENSÃO CONTROLA BARRA LOCAL EXCETO ONDE OUTRA FOR ESPECIFICADA

PARAMETROS DO THERMAL GOVERNOR TURBINE

ACMF DA	MAC	REGULACAO	FLYBALL		SISTEMA DE CONTR.			CS.	TEMP	TURBINA	TERMICA
BARRA	NC.	VELOCIDADE	Ganho	C.T.	T1	T2	T3			C.T.	LIMITE(PW)
ANEL88KV	1	0.0100	1.0000	0.0	0.2500	0.0	0.1000			0.1500	30.4000

* NOTA: QUALQUER PARAMETRO NAO ESSENCIAL OMITIDO DOS DADOS *

* DE ENTRADA ASSUME VALORES APROPRIADOS PARA UTILIZACAO NOS *

* PROCESSOS DE CALCULO COMO MOSTRADO ACIMA. *

* UM VALOR INDICADO COMO SENDO 9.999 OU 99.99 E NA REALIDADE *

* 9999. *

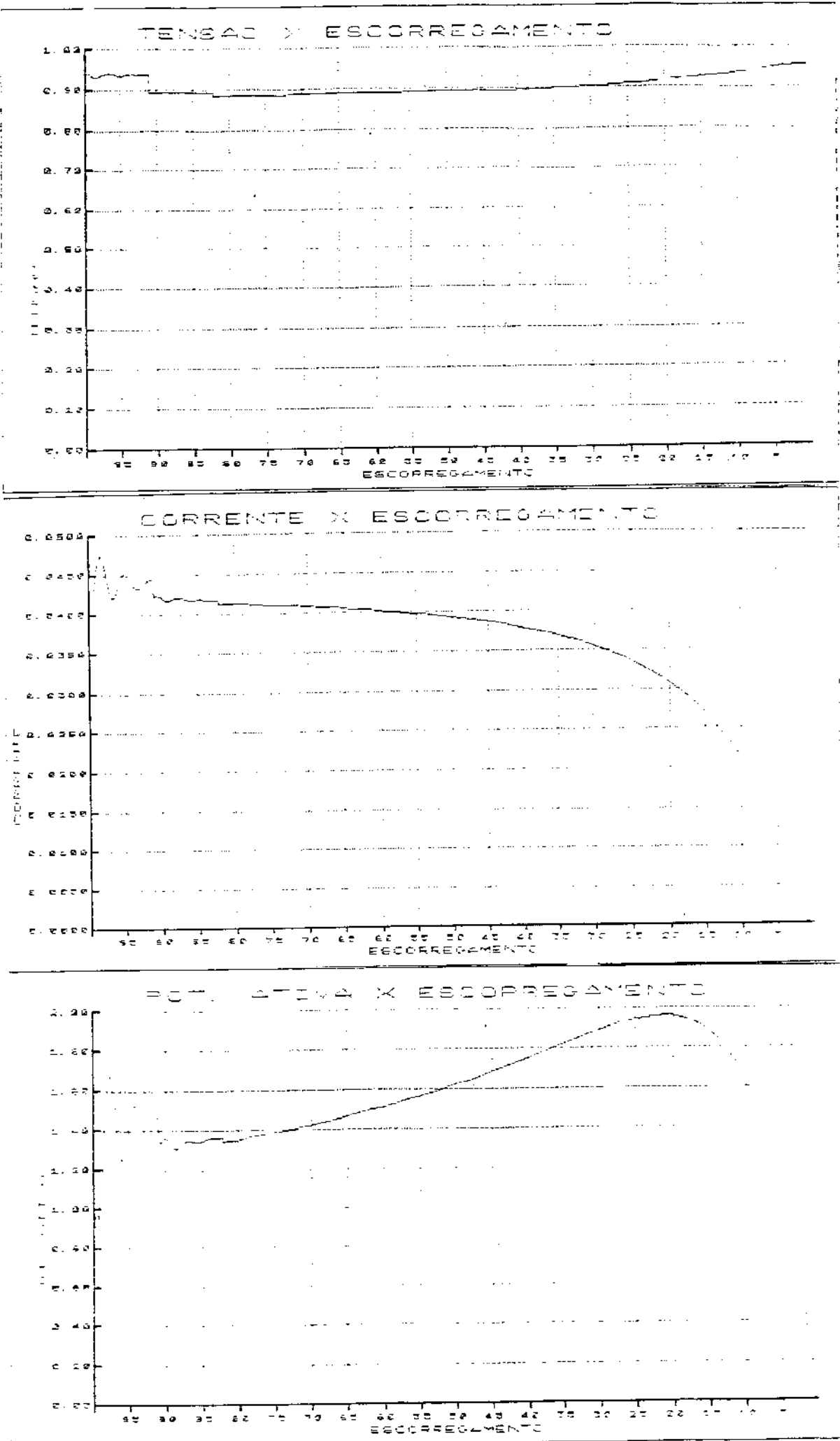


Figura 6.17 - Partida com vários capacitores

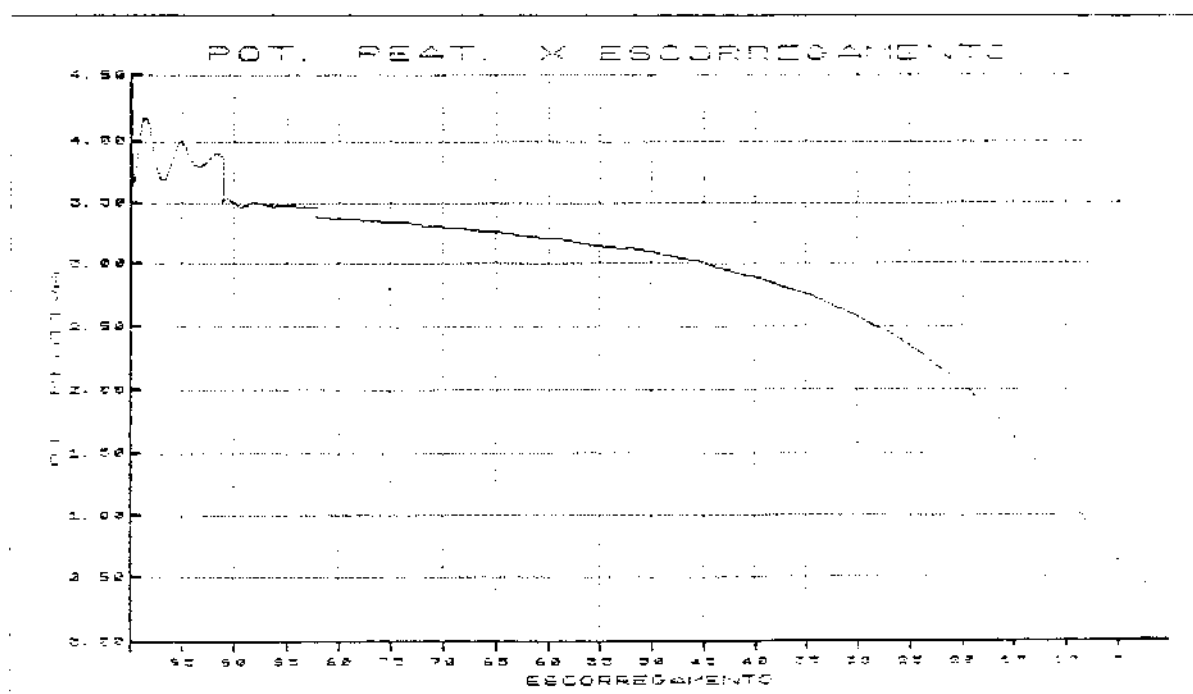


Figura 6.17 - Partida com vários capacitores

6.7 - Considerações Gerais

Através dos casos simulados verificou-se que a modelagem dinâmica detalha com bastante exatidão os efeitos durante o período de partida. Nota-se que as curvas de tensão, corrente, potência ativa e reativa em função do escorregamento apresentam oscilações nos instantes iniciais, o que foi comprovado em laboratório através da montagem experimental.

Com o conhecimento das grandezas relacionadas no estudo, pode-se verificar a influência do processo de partida de uma ou várias máquinas, no comportamento do sistema elétrico, bem como facilitar a escolha do melhor método de partida, para cada motor, a ser utilizado.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES GERAIS

Várias daquelas que se poderiam designar por conclusões específicas de cada capítulo, já foram exploradas ao longo do texto. Desta forma, este capítulo tem por meta discutir alguns resultados mais genéricos sobre o trabalho desenvolvido.

O Capítulo II apresentou o estudo dos métodos convencionais de partida com a utilização de motores de gaiola, e como é do conhecimento geral, há redução do torque de partida, limitando as condições de carga aplicada ao motor durante este período. A utilização do motor de indução com rotor bobinado e motores de gaiola dupla ou tripla vem ampliar a aplicação do motor, isto é conservar as condições de torque de partida, mantendo as mesmas características de redução de flutuação de tensão e seus efeitos inconvenientes. Estas soluções, todavia, têm como inconveniente o alto custo envolvido na construção dos motores.

Procurando uma solução alternativa, isto é, persistindo com o emprego de motores tipo gaiola e procurando uma solução que não leve aos problemas citados, considerou-se a proposta do uso de bancos de capacitores para auxiliar o processo dinâmico da partida. Desta forma, no Capítulo III foi realizado um tratamento matemático da questão, que culminou com a indicação de um processo que permite, com base nas características do motor e dos requisitos impostos para o sistema alimentador, determinar o valor do banco do capacitor.

Comparando o processo de partida considerado no Capítulo III, que tratou da partida do motor de indução com a utilização de capacitores, com os antes estudados no Capítulo II, verificaram-se algumas vantagens na utilização dos capacitores de partida. Estas vantagens são: (i) redução dos efeitos de partida; (ii) aumento do torque de

partida; (iii) redução dos efeitos de quedas de tensão; (iv) melhoria geral do fator de potência do sistema na operação em regime permanente.

Com o método utilizando capacitores na partida apresenta necessidades de um controle dinâmico durante o processo de aceleração do motor, o Capítulo IV considerou formas possíveis para se atingir tal meta. Como primeira hipótese admitiu-se a possibilidade do controle do próprio banco de capacitores quando se detetaram diversos problemas operacionais. De fato, é conhecido que dos dispositivos elétricos, o capacitor é o mais problemático sob o ponto de vista de chaveamento. Assim, passou-se a optar por uma solução alternativa que utiliza um banco de capacitores fixo, operando em paralelo com reator controlado a tiristores. Devido às características naturais, e próprias para condições de chaveamento e controle, foi esta solução adotada para a continuidade do trabalho. No mesmo capítulo apresentaram-se também as bases do projeto do sistema de controle ou de disparo dos tiristores (em anti-paralelo) que proporcionam a variação contínua da indutância vista pelo sistema de alimentação. Destaca-se que o processo de controle implementado, no estágio deste trabalho, constituiu-se de um controle manual.

Procurando comprovar a validade do processo de partida enfocando neste trabalho, assim como ilustrar a funcionabilidade do protótipo construído, passou-se então a execução de testes experimentais, dos quais um resumo foi indicado e discutido no Capítulo V. O equipamento construído foi do tipo trifásico e os oscilogramas obtidos refletiram as grandezas mais significativas. A tensão junto aos terminais do motor, sem dúvida, é a mais indicativa e os diversos oscilogramas fornecidos ilustraram a validade do método. Um fato de relevância constatado durante a execução dos testes ocorreu quando do uso de um banco sobredimensionado. Observou-se um comportamento de oscilações semelhantes ao da ferroressonância.

Com o objetivo de se desenvolver um processo mais geral para avaliar a partida do motor de indução trifásico, foi feita uma adequação de um programa de computador existente para a simulação digital dos métodos de partidas convencionais, bem como a partida com capacitor. Isto foi realizado no Capítulo VI, onde se verificaram, através de um programa de estabilidade transitória, os efeitos das partidas do motor de indução sobre o sistema, bem como as condições de alimentação do motor neste período, traçando curvas de potência ativa, potência reativa, corrente e tensão do motor em função do escorregamento.

A conclusão global do trabalho mostra que o método proposto para a partida de motores de indução trifásico pode ser viável em aplicações industriais, principalmente conjugando a característica de correção do fator de potência do sistema em regime permanente. Esta utilização do método apresenta boas perspectivas de aplicação em substituição a algumas das partidas convencionais, embora se possa ter problemas de custo na sua implantação e manutenção.

Para que o sistema de fornecimento de reativos seja otimizado, é necessário um aprofundamento em termos de controle dos reativos, substituindo o ajuste manual em malha aberta, utilizado no trabalho, por um controle em malha fechada, fazendo com que o suprimento de reativos seja automático em função do nível de tensão do barramento onde se encontram conectados os motores, durante o período de partida, deixando em regime permanente somente o suprimento de reativos necessários à correção do fator de potência do sistema industrial, sendo este controle realizado sobre o reator, através do ângulo α de disparo do tiristor.

APÊNDICE I

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MOTOR DE INDUÇÃO

1.1 - Introdução

O levantamento dos parâmetros do motor é feito através dos ensaios com rotor livre e rotor travado [13].

1.2 - Ensaio do rotor livre ou ensaio a vazio do MIT

Como para o funcionamento a vazio o único conjugado a ser vencido seria aquele devido ao atrito com mancais e ventilação, desprezando praticamente tais efeitos, tem-se que o motor estará girando a velocidade praticamente igual à do campo girante. Nestas condições a tensão induzida no rotor será aproximadamente nula, e, a corrente absorvida pelo primário seria aquela necessária para produção do campo e para sofrer as perdas a vazio, que seriam:

- Perdas no cobre do estator = $P_{enrolamento} = P_{enr}$
- Perdas no ferro do estator = P_{Fe}
- Perdas mecânicas = $P_A + V$

Sendo a corrente absorvida pelo estator, da ordem de 20 a 40% da corrente nominal correspondente, as perdas no cobre não são desprezíveis, tornando-se, pois, necessário um processo de separação de perdas. Para tanto, aplica-se ao estator uma tensão de 120% de seu valor nominal, a qual é gradativamente diminuída até um valor em que o motor não tenha grandes oscilações na velocidade. Durante este processo medem-se, consecutivamente as potências, tensões e correntes da linha traçando as curvas da figura 1.1.

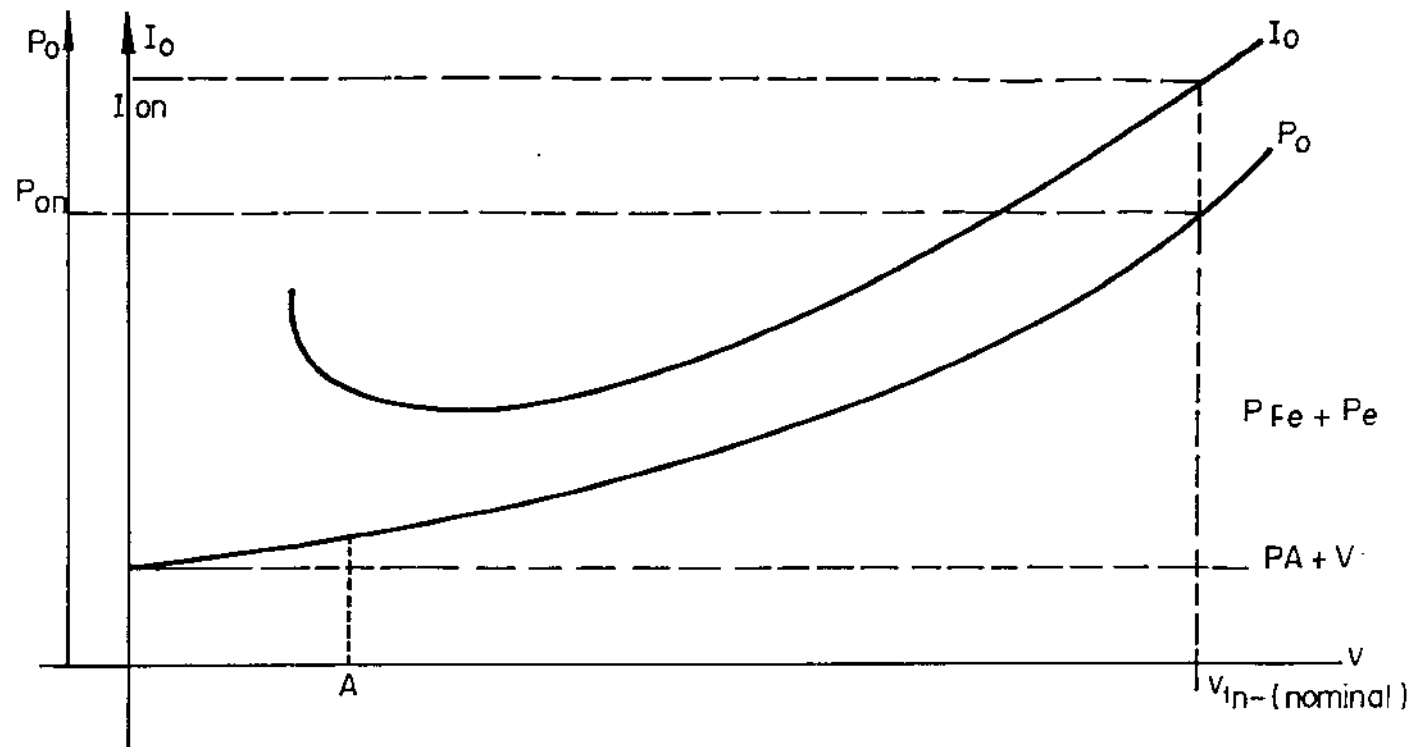


Figura 1.1 - Curvas de separação de perdas

- As perdas magnéticas são função da tensão, logo para $v \approx 0$ equivalente a $P_{Fe} \approx 0$.
- As perdas no cobre são função da corrente, logo para $v \approx 0$ tem-se $I_0 \approx 0$, o que equivale a $P_{nur} \approx 0$
- As perdas por atrito e ventilação dependem em corrente da velocidade e, como para motores de indução esta não depende da tensão, conclui-se que um ponto tal como A (baixa tensão) corresponderá aproximadamente às perdas por atrito e ventilação desejadas. Assim, extrapolando a curva $P_0 = f(v)$ tem-se, onde a mesma encontra o eixo vertical, o valor da potência $P_0(0) = PA + V$.

Considerando o ponto nominal de funcionamento, tem-se:

$$P_{Fe} = P_{on} - PA + V - P_{enr} \quad (1.1)$$

onde:

P_{on} = potência total consumida pelo motor a vazio para tensão nominal

$P_A + V$ = perdas por atrito e ventilação

P_{enr} = perdas no enrolamento = $3 V_1 I_{on}^2$ (sendo V_1 medida com uma fonte, referida a 75°).

Portanto dividindo PF_e por 3, tem-se a potência perdida no ferro para cada fase.

$$PF_{e \text{ por fase}} = PF_e / 3 \quad (1.2)$$

Tem-se então a separação das três perdas e com estas e outras medições obtidas do ensaio a vazio pode-se determinar os parâmetros do ramo magnetizante, como mostra a figura 1.2.

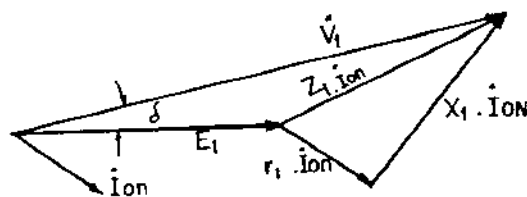
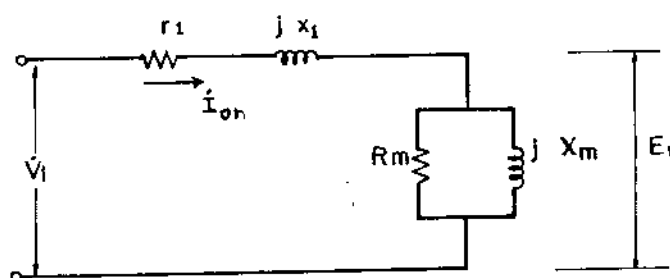


Figura 1.2 - Circuito equivalente e diagrama fasorial do MIT a vazio, onde representa-se uma das fases.

Para a determinação da resistência e reatância de magnetização utiliza-se o circuito equivalente da figura 1.2, de onde pode-se escrever:

$$\dot{V}_1 = E_1 + (r_1 + jx_1) \dot{I}_{on} = E_1 + Z_1 \dot{I}_{on} \quad (1.3)$$

O menor de um pequeno erro pode-se admitir $\delta = 0$, e a equação apresentada se resume a:

$$E_1 = \dot{V}_1 - \sqrt{(V_1)^2 + (x_1)^2} \dot{I}_{on} \quad (1.4)$$

Da equação 1.4, tem-se a tensão aplicada ao ramo, magnetizante. A partir deste valor e observando o citado ramo, considerando que R_m é uma resistência fictícia e traduz as perdas no ferro, pode-se escrever:

$$R_m = \frac{E_1^2}{PF_{e/fase}} \quad (1.5)$$

$$Z_m = \frac{E_1}{I_{on}} \quad (1.6)$$

Como X_m é a reatância que associada em paralelo a R_m , deve corresponder a Z_m , tem-se que:

$$X_m = \frac{Z_m R_m}{\sqrt{(R_m)^2 - (Z_m)^2}} \quad (1.7)$$

1.3 - Ensaio com rotor travado ou em curto-circuito de um MIT

A figura 1.3 representa o circuito equivalente de uma fase do MIT.

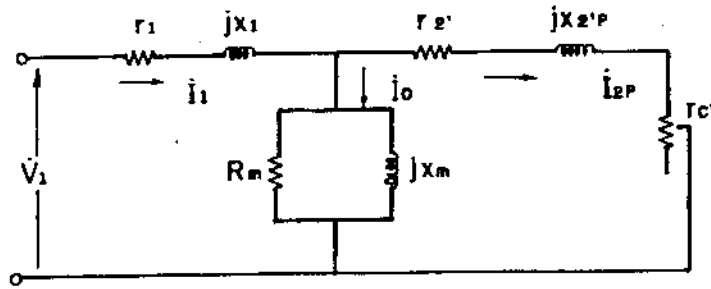


Figura 1.3 - Circuito equivalente referido ao estator

Quando se trava o rotor, tem-se $N_2 = 0$ e $s = 1$. Isto faz com que $V'_C = 0$, o que caracterizará um curto-circuito, responsável pela designação do ensaio. Nestas condições o circuito equivalente será o indicado pela figura 1.4.

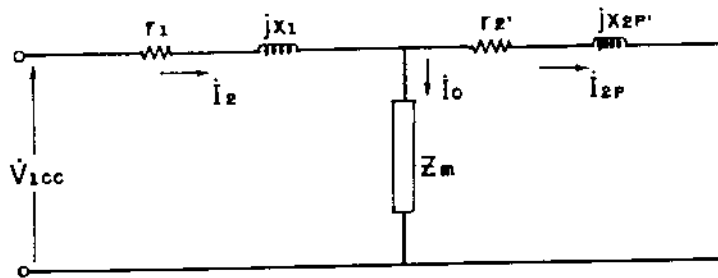


Figura 1.4 - Circuito equivalente no ensaio em curto-circuito.

Para não se ter correntes excessivas, o que ocorreria se fosse aplicado V_1 igual à tensão nominal, a partir de zero, aumenta-se gradativamente a tensão até se ter I_1 igual ao seu valor nominal (mantendo-se o rotor travado). Com isto, se consegue com uma baixa tensão, relativamente ao seu valor nominal, uma simplificação desprezando o ramo magnetizante e o circuito equivalente reduzido tomaria o aspecto da figura 1.5.

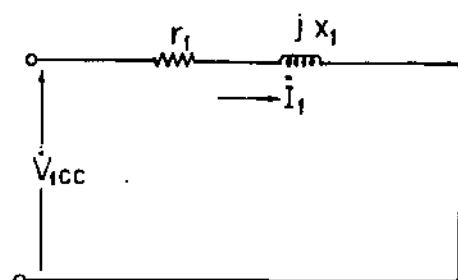


Figura 1.5 - Circuito equivalente do MIT durante o ensaio de rotor bloqueado.

O ensaio em curto-circuito nos permite determinar as perdas totais no enrolamento e os parâmetros R_1 , Z_1 e X_1 , como se descreve a seguir:

$$P_{j/fase} = \frac{P_{j \text{ total}}}{3} \quad (1.8)$$

Do circuito correspondente a figura 1.5 tem-se:

$$R_1 = \frac{P_{j/fase}}{\dot{I}_1^2} \quad (1.9)$$

$$Z_1 = \frac{\dot{V}_{1cc}}{\dot{I}_1} \quad (1.10)$$

$$X_1 = \sqrt{(Z_1)^2 - (R_1)^2} \quad (1.11)$$

Como a realização do ensaio é normalmente a uma temperatura inferior a de funcionamento nominal do motor, é interessante a conversão de R_1 e também Z_1 para a temperatura de funcionamento nominal.

Precisa-se conhecer $\dot{V}_1$, $\dot{V}_2'$, X_1 e X_{2p}'

Com relação a $\dot{V}_1$ e $\dot{V}_2'$, não haverá problema, pois tem-se que:

$$R_1 = \dot{V}_1 + \dot{V}_2'$$

e $\dot{V}_1$, como foi mencionado, pode ser determinado com uma ponte. Referindo $\dot{V}_1$ à temperatura nominal de operação, tem-se que:

$$\dot{V}_2' = R_1 - \dot{V}_1 \quad (1.13)$$

Para calcular X_1 , tem-se que:

$$X_1 = X_1 \frac{\dot{V}_1}{R_1} \quad (1.14)$$

Obtem-se X_{2p}' através de:

$$X_{2p}' = X_1 - X_1 \quad (1.15)$$

BIBLIOGRAFIA

- [1] FITZGERALD, A.E. et alli. "Máquinas Elétricas", McGraw Hill do Brasil, 1975.
- [2] MELO, F.P. - "Dinâmica das Máquinas Elétricas I", Série PTI, Santa Maria-RS-1979 - Eletrobrás.
- [3] KABRI et Alli - "Laurient Stability of Power Systems Containing Both Synchronous and Induction Machines" - Proc. IEEE, 118(10):1467-74, Oct. 1971.
- [4] NICHOLS, Willian _H. et Alli. "Advance in Capacitor Starting" IEEE Transations on Industry Applications, New York, IA-20 (1): Jan./feb. 1984.
- [5] STOUT, J.H. - "Capacitor Starting of Large Motor" IEEE Transactions on Industry Applications, New York, IA-20 (1)- Jan./Feb. 1984.
- [6] SCURGHA, G.S, "Capacitor - Reator Start of Large Synchronous Motor on a Limited Capacitor Network", IEEE Transactions on Industry Applications, New York, IA-20, NO.5, Sept/Oct. 1984
- [7] BRERITON, D.S. et Alli. "Representação of Induction Motor Loads During Power Systems Stability Studies", Trans. A. IEEE (Power Appratus and Systems), New York, 76: 451-61, Aug. 1957

- [8] MATHUR, R.M. (Editor) "Static Compensators for Reactive Power Control", Context Publications, Wimipeg, Canadá, 1984.
- [9] ALAN GREWOOD. "Electrical Transients em Power Systems", Wiley, Interciência, 1971.
- [10] HARRY FRANK and Bo. LANDSTRON. Power-Fator Correction With Thyristor, Controlled Capacitor". Asea Jornal, 1971, vol.44, NO.6
- [11] GYUGYI, L.; OTTO, R.A.; PUTMAN, T.H."Principles and Applications of Static ThyristorControlled Shurt Compensators", IEEE, Transations on Power Apparatus and Systems. New York, 97 (5):1935-45, Sept/Oct, 1978.
- [12] GOES, N.L.V. "Análise, Modelagem e Simulação de Fontes e Fluxo Harmônico em Sistemas Elétricos", MSC Tese, Itajubá - MG, EFEI, 1981.
- [13] OLIVEIRA, J. C. "Motor de Indução", Apostila, Itajubá - EFEI, 1980.
- [14] ELGERD, C.I. "Eletric Power System Theory", McGraw Hill Book Company, New York, 1971.
- [15] ARNOLD, C.P. "Solutions of The Multi - Machine Power System Stability Problem" - PhD Teses, UMIST, 1976.
- [16] SHIN, C.G. "Simulação Digital para Estudos de Estabilidade Transitória e Rejeição de Carga em Sistema Elétrico de Potência", MSc Tese, Itajubá MG, EFEI, 1981.

- [17] MORAES, A.J. "Modelagem de Cargas para Estudo de Estabilidade Transitória", MSc Tese, Itajubá MG, EFEI, 1984.
- [18] PACHECO, E.J.P. "Induction Motor Starting in an Electrical Power - Systems Transient - Stability Programme" MSc Teses, UMIST, 1975.