

ADRIANA YINETH MONTERO CRUZ

TRANSITÓRIOS EM REJEIÇÃO DE CARGA ENVOLVENDO LINHAS DE
TRANSMISSÃO E MOTORES ASSÍNCRONOS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Mestre em
Engenharia.

São Paulo

2009

ADRIANA YINETH MONTERO CRUZ

TRANSITÓRIOS EM REJEIÇÃO DE CARGA ENVOLVENDO LINHAS DE
TRANSMISSÃO E MOTORES ASSÍNCRONOS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Mestre em
Engenharia.

Área de Concentração: Engenharia
Elétrica

Orientador:

Prof. Dr. Luiz Cera Zanetta Junior

São Paulo

2009

FICHA CATALOGRÁFICA

Cruz, Adriana Yineth Montero
Transitórios em rejeição de Carga envolvendo linhas de
transmissão e motores assíncronos / A.Y.M. Cruz. -- São Paulo,
2009.
67 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Auto-
mação Elétricas.

1.Motores de indução 2.Linhas de Transmissão de energia
elétrica 3. Reatores e transformadores I.Universidade de São
Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de
Energia e Automação Elétricas II. t.

DEDICATÓRIA

A meus pais que me incentivaram a dar continuidade nos estudos..

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, aos amigos, e a todos que colaboraram direta ou indiretamente na execução desse trabalho.

Ao CNPq que me auxiliou financeiramente durante o período de execução do trabalho de pós-graduação.

RESUMO

Apesar do grande interesse no comportamento dinâmico das cargas, existe uma lacuna em investigações considerando o seu desempenho transitório, quando alimentadas por linhas de transmissão e a rejeição de carga ocorre com a abertura dos disjuntores do lado fonte, causando sobretensões temporárias.

Este trabalho analisa as sobretensões temporárias causadas por este evento em uma carga de grande porte, constituída por motores síncronos e assíncronos, que pode operar parte do tempo somente com motores assíncronos. Para tanto, foi desenvolvido um modelo de motor de indução, segundo uma transformação eixos direto e de quadratura, com a finalidade de validar e efetuar comparações com o modelo existente no programa ATP.

Dos vários testes de validação realizados e de posse de modelos confiáveis de máquinas, principalmente para os motores de indução, foram examinadas diversas situações operativas, com o programa ATP, procurando investigar as solicitações dielétricas em equipamentos e sobre-excitação de transformadores, quando a linha de transmissão opera com e sem compensação reativa. Dessa análise pode-se obter um panorama do risco operativo em diferentes cenários, verificando-se a necessidade de compensação reativa da linha.

ABSTRACT

In spite of the great interest in the dynamic behavior of loads, there is a gap in investigations considering their transient performance, when they are fed by transmission lines and a load rejection occurs with the tripping of the breakers of the source side, causing temporary overvoltages.

This paper analyzes the temporary overvoltages caused by this event in a large load, constituted by synchronous and asynchronous motors, that can operate part of the time only with asynchronous motors. Therefore, a model of induction motor was developed, according to the direct and quadrature axes transformation, with the purpose to validate and make comparisons with the existent model in the ATP program.

From several validation tests and using reliable machine models, mainly for the induction motors, some operative conditions were examined with the ATP program, trying to investigate equipment dielectric stresses and over-excitation of transformers, when the transmission line operates with and without reactive compensation. From this analysis it can be obtained an overview of the operative risk in different sceneries, being verified the need of reactivate compensation of the line.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Convenção dos enrolamentos.....	8
Figura 2.2 - Representação esquemática do motor assíncrono.....	10
Figura 2.3 - Sistema de coordenadas girante.....	11
Figura 2.4 - Circuito equivalente do motor assíncrono, $\omega = \omega_0$	14
Figura 4.1 - Sistema em 230 kV alimentando o conjunto de motores em 13,8 kV.	28
Figura 4.2 - Representação dos motores e unidades de transformação da subestação.....	30

LISTA DE GRÁFICOS

Figura 3.1 - Corrente nas fases A,B,C do estator.....	16
Figura 3.2 - Correntes nas fases A,B,C do estator (detalhe).....	17
Figura 3.3 - Velocidade angular do motor assíncrono.....	18
Figura 3.4 - Torque do motor assíncrono	19
Figura 1.15 - Torque x velocidade.....	20
Figura 3.6 - Correntes estatóricas nos eixos d,q.....	21
Figura 3.7 - Correntes rotóricas nos eixos D,Q.	22
Figura 3.8 - Correntes nas fases A,B,C do estator.....	23
Figura 3.9 - Correntes nas fases A,B,C do estator (detalhe).....	23
Figura 3.10 - Velocidade angular do motor assíncrono.....	24
Figura 3.11 - Torque do motor assíncrono.	24
Figura 3.12 - Torque x velocidade no modelo do programa ATP.....	25
Figura 4.3 - Sem falta, motores operando: síncrono, motor de indução,motores 4,16kV (incluindo 0,48KV), com transformador abaixador de 2x60 MVA.....	33
Figura 4.4 - Idem caso 1, com carga resistiva de 10 MW.	34
Figura 4.5 - Idem 1, sem saturações nos motores e nos respectivos transformadores abaixadores.....	35
Figura 4.6 – Idem caso1, com representação de pára-raios de ZnO.	36
Figura 4.6a – Idem figura 4.6, com representação de pára-raios de ZnO. Energia nos pára-raios.	37
Figura 4.7 - Idem 5 com carga resistiva de 10 MW.....	38

Figura 4.8 - Idem 1, com uma unidade do transformador abaixador de 60 MVA operando.	38
Figura 4.9 - Idem ao caso 6, com carga de 10 MW.....	39
Figura 4.10 Idem caso 4, com transformador 1x60MVA.	39
Figura 4.11 – Idem caso 1, com falta fase-terra no terminal alimentador (D1).....	40
Figura 4.12 - Idem caso 9, com pára-raios.....	40
Figura 4.13 - Idem 1 com falta fase-terra no terminal da carga (D2).....	41
Figura 4.14 Caso com motor de indução, sem reator na linha.....	42
Figura 4.15 - Caso com motor de indução, com reator de 30 MVAr na linha de transmissão.....	43
Figura 4.16 - Caso com motor de indução, com reator de 15 MVAr na linha de transmissão.....	43
Figura A.1 - Curva de saturação do transformador abaixador.....	53
Figura A.2 – Curva do pára-raios ZnO.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Dados do motor assíncrono.	15
Tabela 4.1 – Resumo dos casos simulados, sem reator e com motores síncronos..	30
Tabela 4.2 – Sobretensões na barra de 230 kV do final de linha (D1).....	31
Tabela 4.3 – Impedâncias dos motores de indução.....	32
Tabela 4.4 – Casos simulados com e sem reator e somente com motores de indução.....	42

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	Fluxo concatenado com o enrolamento
I	Corrente no enrolamento
V	Tensão aplicada no enrolamento
P	Potência ativa da carga
Q	Potência reativa da carga
S	Potência aparente
K	Matriz de transformação para o sistema de coordenadas girante
θ	ângulo do sistema de coordenadas no estator
θ_r	ângulo do rotor
ω	velocidade arbitrária do sistema de coordenadas
f	variável a ser transformada no sistema de coordenadas
ω_0	velocidade angular síncrona
ω_r	velocidade angular do rotor
β	defasagem angular entre estator e rotor
s	escorregamento
V_d	Tensão de eixo direto
V_q	Tensão de eixo de quadratura
V_0	Tensão de seqüência zero
I_d	Corrente de eixo direto

I_q	Corrente de eixo de quadratura
I_0	Corrente de seqüência zero
L_s	Indutância do estator
L_r	Indutância do rotor
L_0	Indutância de seqüência zero
R_s	Resistência do estator
R_r	Resistência do rotor
M	Indutância mútua
T_e	Torque elétrico
P	número de pólos do motor
J	Momento de inércia
T_r	Torque resistente

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivos.....	2
1.2	Justificativa.....	3
2	MODELAGEM DO MOTOR DE INDUÇÃO.....	5
2.1	Estado da arte: Modelo do motor assíncrono.....	5
2.2	Modelagem do motor assíncrono.....	7
3	COMPARAÇÃO COM RESULTADOS DO PROGRAMA ATP.....	16
3.1	Partida do Motor assíncrono alimentado por um barramento infinito.....	17
3.1.1	Resultados obtidos com simulações, utilizando o programa desenvolvido.....	17
3.1.2	Resultados obtidos com simulações, utilizando o programa ATP.....	24
3.2	Comentários.....	26
4	RESULTADOS PARA UMA INSTALAÇÃO DE GRANDE PORTE.....	28
4.1	Casos avaliados.....	29
4.1.1	Detalhamento da Carga.....	31
4.2	Resultados.....	31
4.2.1	Caso 1.....	33
4.2.2	Caso 2.....	34
4.2.3	Caso 3.....	35
4.2.4	Caso 4.....	36
4.2.5	Caso 5.....	37
4.2.6	Caso 6.....	38
4.2.7	Caso 7.....	39
4.2.8	Caso 8.....	39
4.2.9	Caso 9.....	40
4.2.10	Caso 10.....	40
4.2.11	Caso 11.....	41

4.2.12 Caso 12	42
4.2.13 Caso 13	43
4.2.14 Caso 14	43
5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	45
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48
7 ANEXO A.....	51
7.1 Dados do motor síncrono	51
7.2 Dados do motor de indução 13,8 kV.....	52
7.3 Representação de saturações.....	53
7.4 Representação de pára-raios ZnO	54
7.5 Dados da linha de transmissão	55

1 INTRODUÇÃO

A análise de um sistema elétrico de grande porte, ou mesmo de um sistema industrial, consiste em estudar o seu comportamento tanto em regime permanente como em regime transitório, quando submetido a determinadas perturbações e assim determinar sua capacidade de suportar os diferentes eventos que possam ocorrer, sem se danificar, em vista dos altos custos envolvidos.

Ao estudarmos o comportamento de cargas elétricas de grande porte, compostas, em boa parte, por motores assíncronos, dedicamos especial atenção à partida dos motores, principalmente os de elevada potência nominal. Devido à sua influência considerável nos aspectos dinâmicos de um sistema elétrico, no procedimento de partida com tensão nominal, estes motores podem absorver correntes com valores aproximadamente seis vezes maiores do que os nominais. Além disso, é conveniente considerar sua contribuição para as correntes de curto-circuito, pois é sabido que esta contribuição pode ser significativa em grandes instalações elétricas, com efeitos também no dimensionamento da proteção.

Normalmente em estudos de rejeição de carga, o fenômeno é tratado com a abertura de um dos terminais da linha de transmissão, permanecendo o outro terminal conectado a um sistema elétrico que contém fontes de tensão, principalmente os geradores do sistema. Com esta verificação são estudadas as sobretensões que possam causar impactos no isolamento e queima de equipamentos e que são muito importantes também para o dimensionamento de pára-raios. Apesar do grande interesse no comportamento dinâmico da carga, na maioria das vezes considerando seu impacto em avaliações de estabilidade da rede, existe uma lacuna em investigações, ou de resultados publicados sobre rejeições de carga, levando em conta o seu comportamento transitório. Mais especificamente, são poucas as informações sobre o seu comportamento, quando constituída basicamente por motores, ao permanecer ligada a linhas de transmissão, em situações em que a alimentação é interrompida pelo lado fonte.

No sistema elétrico brasileiro, dadas as grandes distâncias envolvidas, muitas vezes encontramos grandes cargas elétricas, alimentadas radialmente por linhas de transmissão, o que poderia levantar a questão da segurança da instalação no

período em que a alimentação estivesse nesta situação puramente radial. Com o crescimento da rede, esta condição radial evolui para uma configuração mais malhada, o que atenua o problema da rejeição de carga, porém, cabe averiguar e propor medidas operativas, controlando eventuais sobretensões que poderiam ocorrer nesse período inicial da instalação.

1.1 Objetivos

Os principais objetivos desta dissertação referem-se às investigações descritas a seguir.

Inicialmente será apresentado o desenvolvimento de uma modelagem do motor de indução que permita a elaboração de um programa para análise de transitórios eletromagnéticos e também eletromecânicos. Apesar do modelo do motor de indução estar disponível em vários aplicativos, será de interesse a preparação de uma ferramenta específica, voltada para estudos de transitórios eletromagnéticos, na qual o controle das variáveis seja bem mais flexível do que em programas conhecidos. Além disso, com a rotina desenvolvida, será possível avaliar, de forma comparativa, o comportamento deste tipo de carga, confrontando os resultados com os obtidos em um outro software de ampla utilização, como é o caso do programa ATP (Alternative Transients Program). Dessa forma, com a rotina desenvolvida, será simulado o comportamento do motor de indução, em um cenário específico, comparando os resultados de determinados tipos de perturbações eletromagnéticas, com resultados obtidos com o programa ATP, confrontando-se os resultados, permitindo assim a validação dos modelos destas ferramentas.

Em seguida, será objeto deste trabalho a análise do impacto de eventuais sobretensões, causadas por abertura de linhas pelo lado da alimentação, sobre uma instalação composta por uma grande carga, constituída por motores síncronos e assíncronos, que pode operar parte do tempo somente com motores assíncronos. Desse modo será possível determinar o montante de compensação reativa da linha de transmissão necessária para operação segura da rede elétrica. Esta análise tem o objetivo de investigar os aspectos metodológicos atualmente adotados, com relação à compensação reativa. Em alimentações de grandes cargas elétricas, por sistemas radiais, têm sido considerados os aspectos de abertura da extremidade da

linha de transmissão no lado carga, como uma rejeição de carga sobre a rede de alimentação.

Neste trabalho, conforme menção anterior, será também investigada a possibilidade de abertura do lado fonte, sobre a carga. Tal aspecto tem sido relevado em segundo plano, sob a ótica de que a carga teria um comportamento amortecedor de eventuais sobretensões, sendo esta muitas vezes representada por um circuito puramente passivo. No âmbito deste trabalho, será portanto avaliado o comportamento dinâmico dos motores assíncronos nesta condição operativa, além de uma análise crítica das necessidades de compensação reativa para esta situação.

Desta forma, pretende-se também efetuar um maior detalhamento da representação dos motores assíncronos de uma instalação alimentada por uma linha longa, conectados ao nível de tensão de 13,8 kV, avaliando o seu comportamento diante de perturbações na rede. Além disso, serão feitas verificações e análises do modelo desenvolvido com modelos existentes em outros programas de simulação, como é o caso do programa ATP.

Visando uma comparação entre modelos de motores assíncronos, ainda que de forma simplificada (sem considerar a saturação), utilizando o modelo desenvolvido para um motor assíncrono do tipo gaiola de esquilo, serão confrontados os resultados com os obtidos por meio de modelos disponíveis no programa ATP. Esta análise poderá auxiliar no entendimento dos resultados de ambos os programas e conferir maior confiança aos resultados obtidos com o programa ATP.

1.2 Justificativa

Atualmente, estima-se que os motores elétricos sejam responsáveis por um pouco mais do que 40% da energia elétrica consumida no país [3]. Com base nesta constatação, torna-se evidente a necessidade de representá-los adequadamente, na realização de estudos sobre o seu comportamento e da rede, em situações transitórias diante de perturbações no sistema elétrico. No que se refere a sistemas industriais, torna-se imperativa a representação detalhada desses motores, tendo em vista sua grande influência no comportamento transitório da carga e sistema de alimentação [10,11,12,13,30].

Tal fato demonstra a importância de uma representação confiável e precisa na análise de sistemas elétricos, principalmente em estudos onde o comportamento diante de transitórios eletromagnéticos do sistema esteja sendo focado. Do ponto de vista de análises dinâmicas, existem modelos em bases fasoriais suficientemente confiáveis, com larga experiência sobre o seu desempenho [13,16,17,30]. Do ponto de vista de transitórios eletromagnéticos, cabem ainda verificações sobre o comportamento de modelos e sua representação trifásica.

Atualmente parte considerável das publicações científicas da área de potência trata da modelagem e identificação de cargas elétricas. A partir dos sucessivos blecautes nos grandes sistemas de potência, como Nova Iorque em 1965 e Suécia em 1983, evidenciou-se a necessidade de atenção, não somente na modelagem da geração, mas também da carga.

O trabalho é apresentado com a seguinte estrutura. No capítulo 2 apresenta-se o estado da arte da modelagem dos motores assíncronos, assim como as equações utilizadas no desenvolvimento do modelo de quinta ordem nos eixos direto e de quadratura. No capítulo 3 são feitas análises comparativas dos resultados do modelo desenvolvido com resultados de modelos disponíveis no programa ATP. O capítulo 4, apresenta um estudo de caso e trata de aspectos metodológicos na representação de cargas constituídas por motores elétricos, alimentados por linhas de transmissão, analisando a compensação reativa e sobretensões sustentadas quando da perda da alimentação. No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões para investigações futuras.

2 MODELAGEM DO MOTOR DE INDUÇÃO

2.1 Estado da arte: Modelo do motor assíncrono

O motor de assíncrono foi inventado em 1888 nos Estados Unidos da América por Nikola Tesla [1]; nove anos depois Steinmetz [2] apresentou um modelo de circuito equivalente para representar a máquina de indução operando em regime permanente, modelo ainda hoje utilizado. As equações do circuito equivalente, juntamente com a equação de oscilação (swing) para o escorregamento, constituem o chamado modelo de primeira ordem para o motor de assíncrono.

Tradicionalmente, a modelagem mais simples da carga tem sido realizada assumindo modelos para impedância, potência ou corrente constantes ou como uma combinação destas grandezas [4,5,6,7,8]. Este tipo de modelagem foi muito utilizado, pois representa a carga elétrica de um sistema de potência a partir de um referencial na geração, o que facilitava a análise. Com base nestas concepções foi estabelecido o modelo de primeira ordem do motor assíncrono, que corresponde ao modo mais simples de se considerar as não linearidades do sistema.

Dentre essas possibilidades, geralmente é utilizada a modelagem de potência constante, para cargas compostas por motores assíncronos, pois este procedimento apresenta um bom desempenho quando os motores operam com carga nominal. Para a condição de carga leve, é mais adequada a modelagem por corrente constante. Já na análise da partida de motores, a modelagem por impedância constante é a mais razoável.

Na década de setenta foram apresentados vários estudos a respeito das características em regime permanente das cargas elétricas de um sistema de potência, em função da variação de tensão. O modelo do motor assíncrono, em função da tensão, foi adequadamente representado por polinômios, obtidos a partir da interpolação de resultados de testes, descrevendo satisfatoriamente o comportamento de motores, dentro de determinadas faixas de tensão. Diversos autores propuseram modelagens semelhantes com base na análise de cargas com comportamentos similares.

Nos modelos estáticos, as potências ativa e reativa da carga são representadas

geralmente como função exclusiva da tensão, isto é $P = f_1(V)$ e $Q = f_2(V)$. Esta função pode ser um polinômio do tipo $aV^2 + bV + c$ ou uma função potenciação $P = V^n$, onde n é um número real. Os coeficientes dos polinômios são obtidos a partir de resultados de testes e com a utilização de ferramentas matemáticas tais como regressão numérica, métodos dos mínimos quadrados, etc.

A referência [9] sugeriu que a modelagem de carga fosse representada pela função potenciação, pois desse modo uma única equação poderia representar qualquer tipo de carga, inclusive as compostas. Alertava também para a dificuldade de utilização desses modelos de carga na análise de um curto-circuito, impossibilitando a solução da rede. Lembrava ainda, que a utilização de tais modelos é restrita a uma pequena faixa de tensão na vizinhança da nominal, geralmente (0,8 a 1,2 pu).

Posteriormente, em [10,11] os autores advertiam sobre a inadequação de modelagens estáticas para cargas compostas por máquinas rotativas, sugerindo representações mais realistas. Nestes trabalhos, os autores mostraram a influência dos motores assíncronos na dinâmica do sistema, principalmente para grandes variações de tensão. Tendo em vista a importância desses motores nos sistemas e considerando o seu grande número e diversidade, a modelagem estática $S = f(V)$ não representa convenientemente cargas dinâmicas $S = (V, t)$.

Uma nova linha de representação de cargas elétricas surgiu no início da década de 80, visando estudar coerentemente a dinâmica de um sistema sem perder as facilidades da modelagem estática. Essa modelagem utilizava como representação da carga, para uma parte do sistema, uma impedância em paralelo com um motor assíncrono equivalente. Essa proposta complementa a modelagem estática com uma carga rotativa, inserindo as características do sistema que são dependentes do tempo. Pouco depois, surge uma das modelagens mais utilizadas em análise de sistemas elétricos, com uma formulação em equações diferenciais de quinta ordem.

O modelo de quinta ordem proposto por em [12], pode ser descrito em termos de correntes ou de fluxos magnéticos. Este é o modelo mais detalhado de motor assíncrono utilizado em estudos de análises de redes. Este modelo oferece uma melhor representação da dinâmica da carga, mas em contrapartida apresenta um

considerável custo computacional, como consequência do maior número de equações diferenciais não lineares, bem como da necessidade de pequenos passos na integração numérica.

Na análise de sistemas elétricos, especialmente do tipo industrial, a utilização do modelo de quinta ordem, ou acima, é quase que obrigatória. Esta conclusão é baseada em trabalhos clássicos que mostram a influência da modelagem da carga nos sistemas elétricos, como em trabalhos recentes que mostram a maior precisão deste modelo em comparação com os de ordem reduzida [12].

Cabe lembrar que normalmente são feitas algumas simplificações na modelagem, voltada para representações fasoriais, desprezando-se os termos variacionais e o efeito da seqüência zero [13, 14, 15,16,17,30].

O programa ATP contém uma representação genérica de máquinas elétricas, denominada de máquina universal, na qual, dentre os modelos disponíveis, consta a representação de motores assíncronos, voltada para estudos de transitórios eletromagnéticos. A representação destes modelos e sua implementação, conforme o método de integração trapezoidal, é discutida nas referências [18,19,20,21].

A seguir, é feito o desenvolvimento das equações que caracterizam este modelo de quinta ordem com base em transformações conhecidas para o eixo direto e eixo de quadratura, para um motor assíncrono de gaiola de esquilo, trifásico e sem simplificações nas equações lineares. A saturação não é considerada no modelo.

No entanto, cabe considerar a importância de se desenvolver a modelagem destes motores, com a finalidade de preparação de rotinas de cálculo de variáveis que representem o comportamento transitório dos motores em redes elétricas. Tal implementação poderá servir de base para comparações de modelos e também se configurar como uma plataforma de desenvolvimento de futuros modelos.

2.2 Modelagem do motor assíncrono

As principais hipóteses adotadas na modelagem das máquinas elétricas, em particular das assíncronas, são também empregadas neste trabalho, quais sejam [12]:

1. O entreferro da máquina é considerado constante e independentes da temperatura e da frequência.
2. Os enrolamentos tanto do estator como do rotor são idênticos e têm parâmetros constantes.
3. As perdas rotacionais são consideradas na potência de carga ou desprezadas quando o torque de carga for nulo.
4. O fluxo magnético no entreferro é suposto radial e senoidal.
5. A máquina é trifásica e ligada em estrela.

A modelagem do motor assíncrono é desenvolvida com a aplicação das leis da indução eletromagnética a um circuito ou enrolamento, assim como mostrado na figura 2.1 e na equação 2.1:

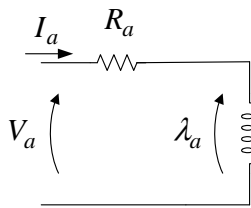


Figura 2.1 - Convenção dos enrolamentos.

$$V_a = R_a I_a + \frac{d}{dt} \lambda_a \quad (2.1)$$

λ : é fluxo concatenado com o enrolamento

Aplicando a expressão a um sistema trifásico, têm-se as seguintes equações.

$$V_{as} = R_s I_{as} + \frac{d}{dt} \lambda_{as} \quad (2.2)$$

$$V_{bs} = R_s I_{bs} + \frac{d}{dt} \lambda_{bs} \quad (2.3)$$

$$V_{cs} = R_s I_{cs} + \frac{d}{dt} \lambda_{cs} \quad (2.4)$$

O primeiro passo no desenvolvimento de um modelo mais conveniente, sem a presença de parâmetros variáveis no tempo, consiste na transformação das variáveis de armadura para um sistema de coordenadas no qual a referência possa estar localizada no estator, no rotor ou em um sistema síncrono. Para isto, é conveniente trabalhar com enrolamentos de armadura equivalentes sobre dois eixos fictícios chamados eixo direto, d , e eixo de quadratura, q . São utilizadas transformações para projetar as variáveis nestes eixos, sendo clássica a transformada de Park, muito embora outras transformações possam ser utilizadas [12]. A mudança de variáveis, por meio dessas transformações, pode ser expressa, por exemplo:

$$\begin{bmatrix} V_{dq0} \end{bmatrix} = [T] \times \begin{bmatrix} V_{abc} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Como três variáveis estão presentes no sistema de coordenadas de fase abc , em geral, três variáveis também são necessárias no novo sistema de referência, aqui denominado $dq0$. São então utilizadas duas correntes i_d e i_q , que produzem o campo magnético e uma terceira corrente i_0 que não apresenta contribuição para o campo no entreferro. Esta corrente, denominada de corrente de seqüência zero, corresponde à corrente de seqüência zero segundo a teoria de componentes simétricas. Quando as correntes de fase são balanceadas e sua soma for nula, i_0 também é nula.

A transformada de Park, apresentada em 1920, apresenta uma transformação de coordenadas do estator para uma referência colocada no rotor da máquina síncrona, cuja principal vantagem é eliminar as indutâncias variáveis no tempo, devido a relutâncias variáveis com a posição angular do rotor.

Do ponto de vista do motor de indução, outras transformações foram propostas. Estas transformações permitem eliminar indutâncias variáveis no tempo de uma máquina simétrica, transformando variáveis estatóricas e rotóricas para uma referência síncrona (com o campo magnético). Alternativamente, verificou-se também a possibilidade de se colocar a referência no rotor do motor de indução.

As transformações aplicáveis a um motor de indução foram generalizadas em 1965,

através de uma transformação geral, denominada de transformação arbitrária, ou seja as transformações conhecidas poderiam ser obtidas da transformação arbitrária, segundo a velocidade de rotação do sistema de coordenadas girantes ω . Por exemplo, a transformada para uma referência síncrona, pode ser obtida, fazendo-se $\omega = \omega_0$ para o sistema de coordenadas girante.

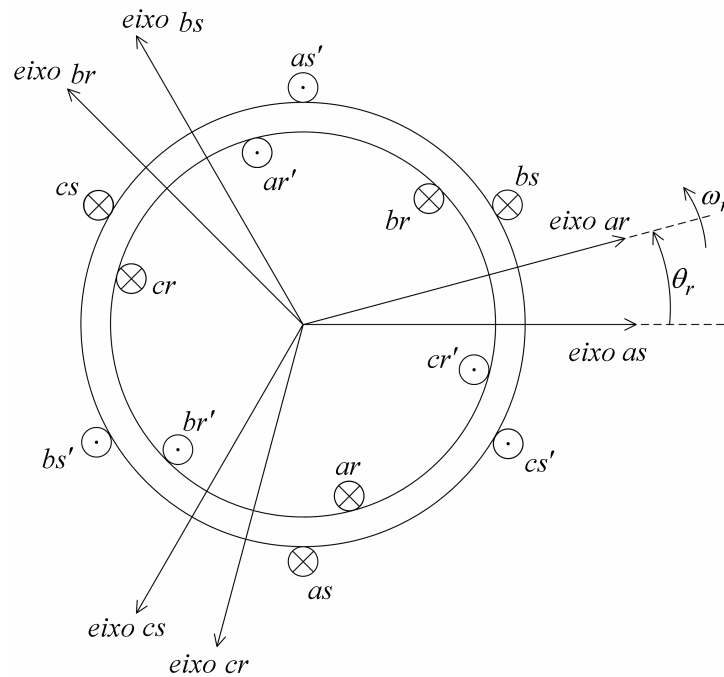


Figura 2.2 - Representação esquemática do motor assíncrono.

As seguintes matrizes podem ser utilizadas na transformação de coordenadas para um sistema de coordenadas síncrono:

$$K = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \text{sen} \theta & \text{sen}(\theta - 120^\circ) & \text{sen}(\theta + 120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$K^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \text{sen} \theta & 1 \\ \cos(\theta - 120^\circ) & \text{sen}(\theta - 120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta + 120^\circ) & \text{sen}(\theta + 120^\circ) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Onde

$$\theta = \int_0^t \omega(\xi) d\xi + \theta(0) \quad (2.8)$$

Neste sistema de coordenadas, para um determinado conjunto de variáveis f , como correntes, tensões ou fluxos, temos a relação:

$$[f_{qd0}] = [K] \times [f_{abc}] \quad (2.9)$$

Com base nestas expressões, as equações que descrevem o escorregamento da máquina serão as seguintes, adotando-se um referencial síncrono:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_0 \quad (2.10)$$

$$\frac{d\theta_r(t)}{dt} = \omega_r \quad (2.11)$$

$$\frac{d\beta(t)}{dt} = \omega_0 - \omega_r \quad (2.12)$$

$$s = \frac{\omega_0 - \omega_r}{\omega_0} \quad (2.13)$$

$$\frac{d\beta(t)}{dt} = s\omega_0 \quad (2.14)$$

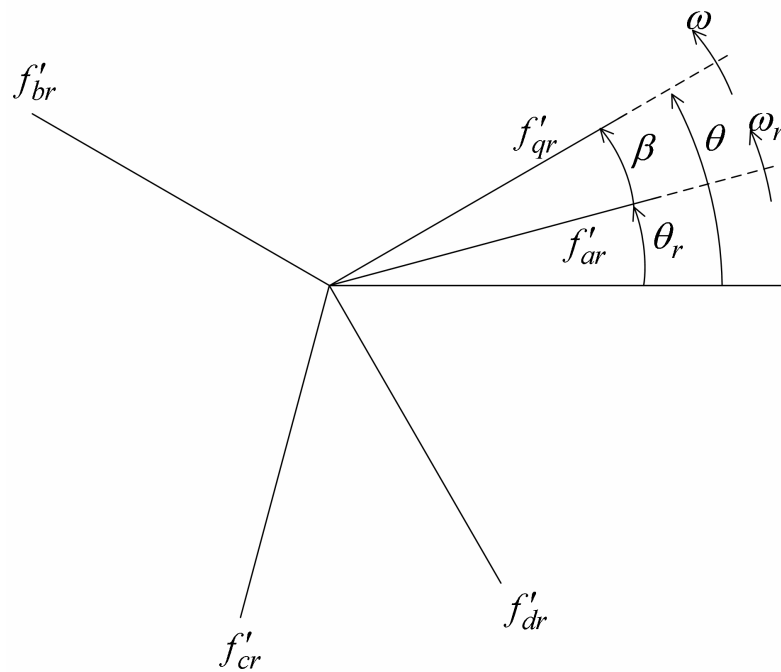


Figura 2.3 - Sistema de coordenadas girante.

Observamos que a transformação de coordenadas é de um circuito estacionário para um sistema com velocidade angular de rotação $\omega = \omega_0$, sendo imediata a transformação para os enrolamentos do estator. O equacionamento do rotor é feito de modo semelhante, a partir de uma transformação de sistemas de coordenadas girantes, com o sistema rotórico assumindo velocidade ω_r . São desenvolvidas as equações do rotor e transformadas para o sistema de referência levando em conta a defasagem angular $\beta = \theta - \theta_r$ [12].

Em linhas gerais, o equacionamento básico conduz ao sistema de equações descrito a seguir, feitas as transformações correspondentes das coordenadas de fase para o sistema de eixos girantes.

Obtêm-se as seguintes equações, adotando-se a nomenclatura ds, qs para o estator e dr, qr para o rotor.

Para o estator:

$$V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega_0 \lambda_{qs} \quad (2.15)$$

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega_0 \lambda_{ds} \quad (2.16)$$

$$V_{0s} = R_s I_{0s} + \frac{d\lambda_{0s}}{dt} \quad (2.17)$$

Para o rotor:

$$V_{dr} = R_s I_{dr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} - (\omega_0 - \omega_r) \lambda_{qr} \quad (2.18)$$

$$V_{qr} = R_s I_{qr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} + (\omega_0 - \omega_r) \lambda_{dr} \quad (2.19)$$

$$V_{0r} = R_s I_{0r} + \frac{d\lambda_{0r}}{dt} \quad (2.20)$$

As relações entre fluxos e correntes são estabelecidas conforme a expressão matricial abaixo indicada, são também obtidas a partir das transformações para os eixos do sistema de coordenadas, a partir dos valores de fases:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{0s} \\ \lambda_{qr} \\ \lambda_{dr} \\ \lambda_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & & & & & \\ & L_s & & & & \\ & & L_{0s} & & & \\ M & & & L_r & & \\ & M & & & L_r & \\ & & & & & L_{0r} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{qs} \\ I_{ds} \\ I_{0s} \\ I_{qr} \\ I_{dr} \\ I_{0r} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Para o desenvolvimento das equações da máquina assíncrona, são construídas as relações que fundamentam a elaboração de um programa de simulação. A equação de torque é dada pela expressão a seguir, complementando o equacionamento do ponto de vista dos circuitos elétricos do estator e do rotor.

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) M (I_{qs} I_{dr} - I_{ds} I_{qr}) \quad (2.22)$$

P : número de pólos do motor.

Da equação de oscilação, é possível obter o comportamento eletromecânico do motor, levando em conta o conjugado resistente da carga e o momento de inércia do conjunto composto pelo motor e carga.

$$J \frac{d}{dt} \omega_r = T_e - T_R \quad (2.23)$$

ou ainda,

$$J \frac{2}{P} \frac{d}{dt} \omega_r = T_e - T_R \quad (2.24)$$

J : momento de inércia do conjunto motor e carga

T_R : torque resistente

O seguinte circuito equivalente pode ser proposto para o motor assíncrono:

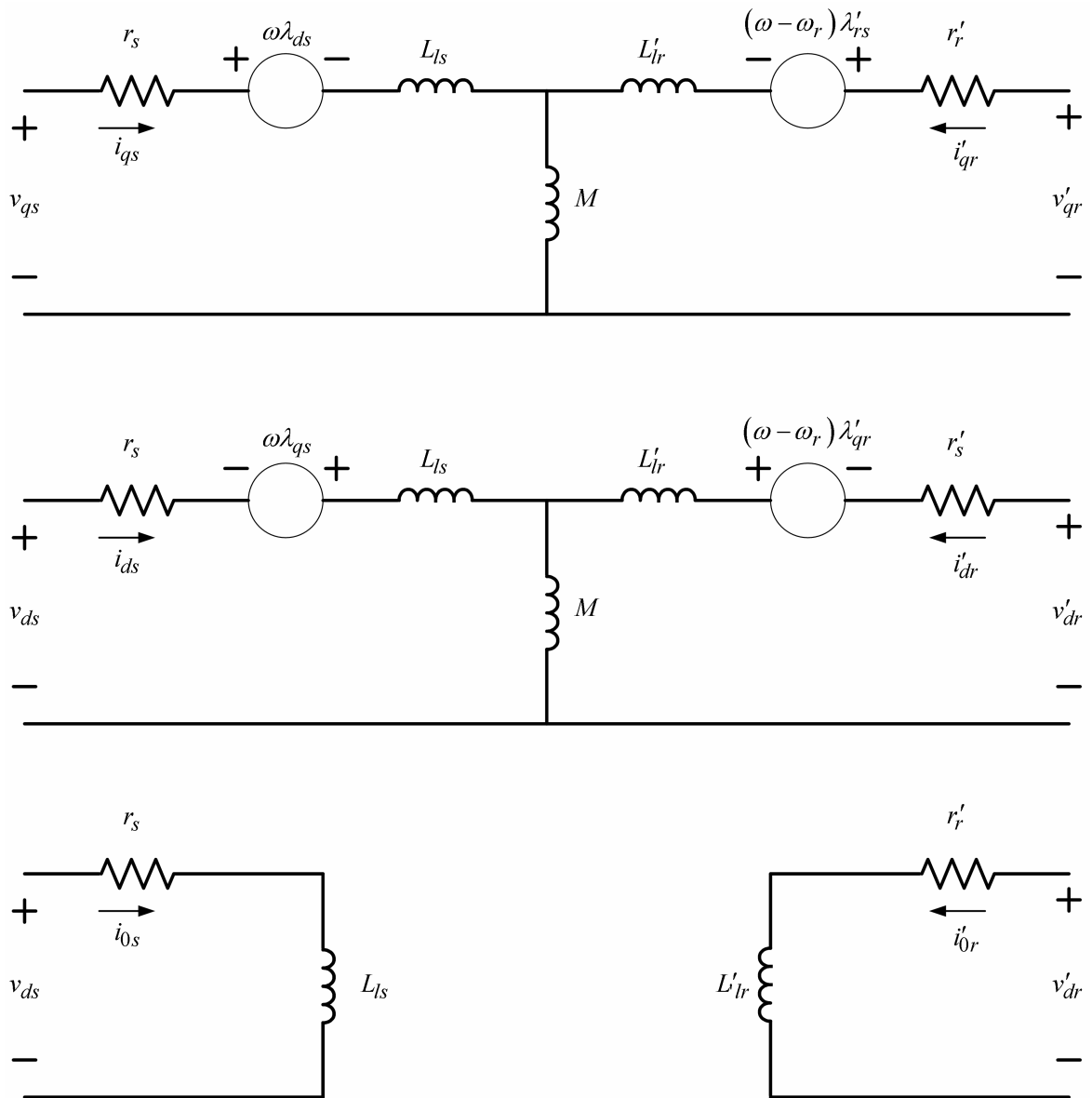


Figura 2.4 - Circuito equivalente do motor assíncrono, $\omega = \omega_0$

As equações diferenciais e algébricas, descritas acima, foram programadas em uma rotina de integração [31], com a qual é possível estudar o comportamento transitório de um motor em uma rede simples. Os símbolos com apóstrofo indicam variáveis do rotor referidos ao estator:

3 COMPARAÇÃO COM RESULTADOS DO PROGRAMA ATP

O presente capítulo descreve os resultados comparativos do modelo desenvolvido e do modelo disponível no programa ATP.

De acordo com os objetivos propostos, apresenta-se a simulação da partida de um motor assíncrono (gaiola de esquilo) alimentado por uma fonte ideal de tensão, correspondente a um barramento infinito. Os resultados obtidos são comparados com os resultados apresentados pelo programa ATP [18]. São comparadas as variáveis típicas de análise, correspondentes a valores de correntes e tensões de fase, assim como a velocidade angular.

O motor assíncrono utilizado nas simulações apresenta os seguintes dados, com os valores do rotor referidos ao estator:

Parâmetros do motor	
Potência [hp]	50
Tensão [V]	460
Corrente [A]	46,8
Frequência	60
Numero de pólos	2
J [kg.m ²]	1,00
Rs[Ω]	0,531
Ls[H]	0,0873
Lls[H]	0,0025
M[H]	0,0848
Rr[Ω]	0,408
Lr[H]	0,0873
Llr[H]	0,0025

Tabela 3.1 – Dados do motor assíncrono.

3.1 Partida do Motor assíncrono alimentado por um barramento infinito

3.1.1 Resultados obtidos com simulações, utilizando o programa desenvolvido

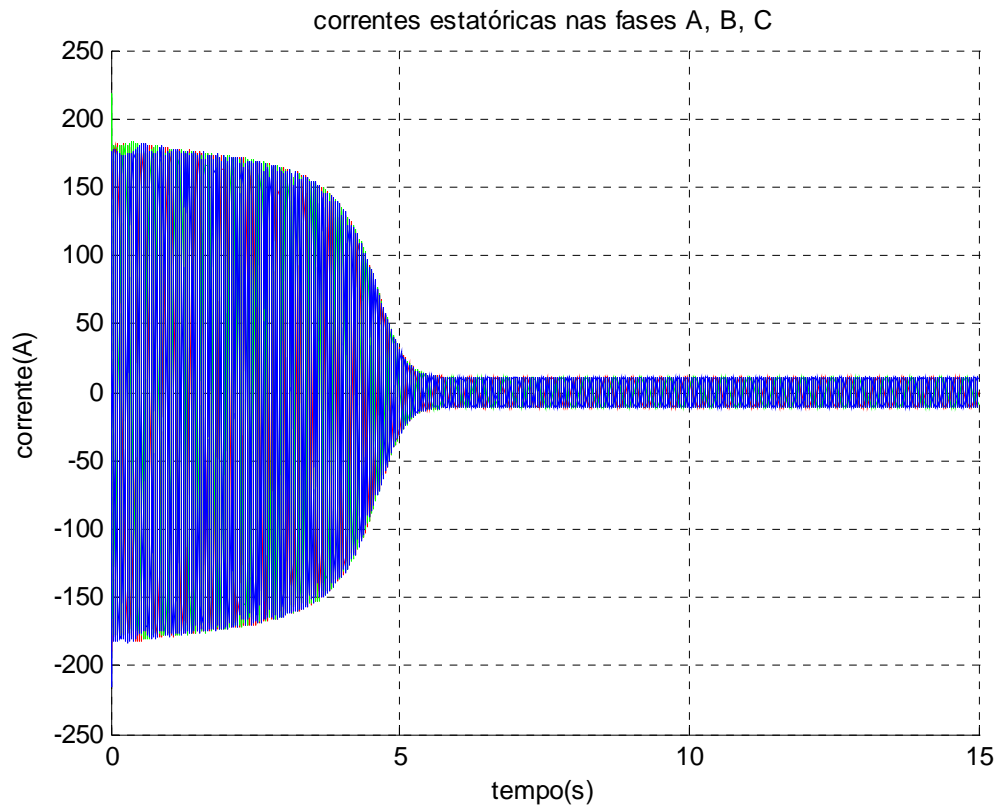


Figura 3.1 - Corrente nas fases A,B,C do estator.

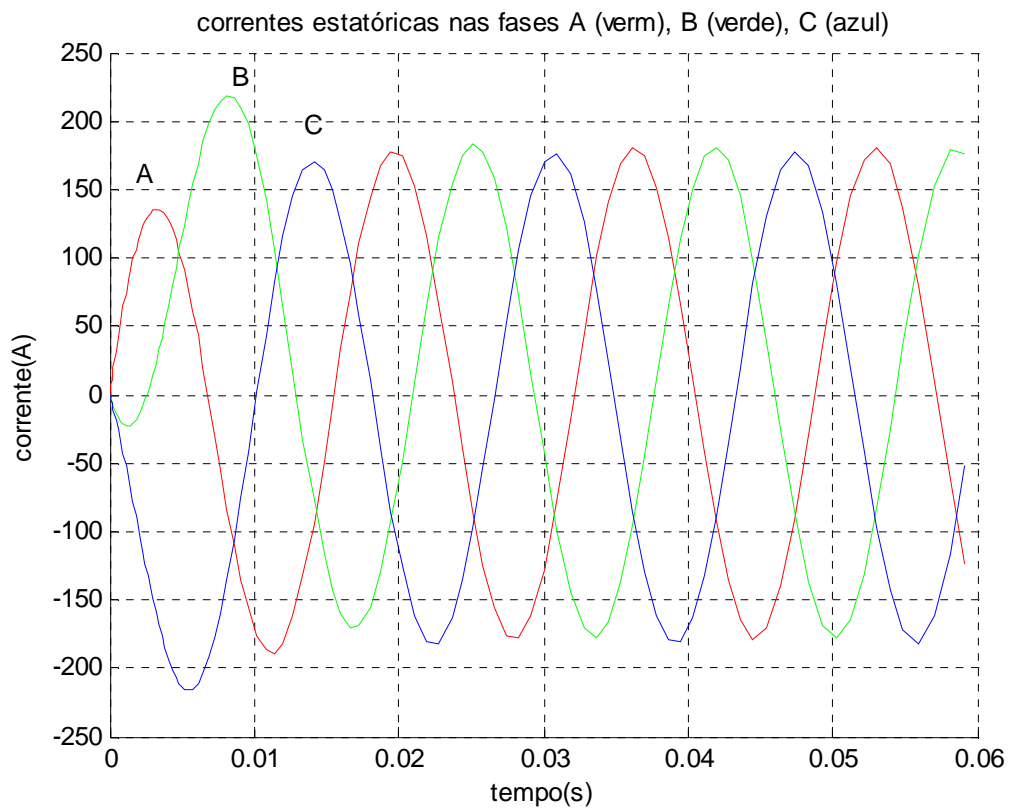


Figura 3.2 - Correntes nas fases A,B,C do estator (detalhe).

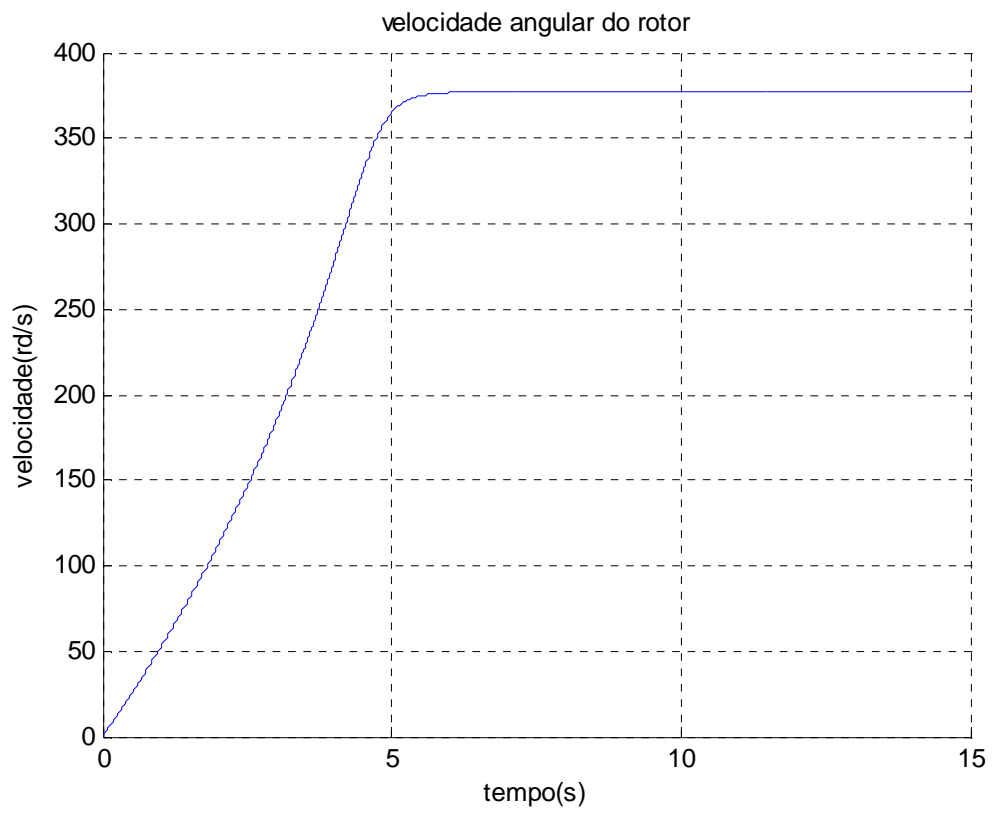


Figura 3.3 - Velocidade angular do motor assíncrono.

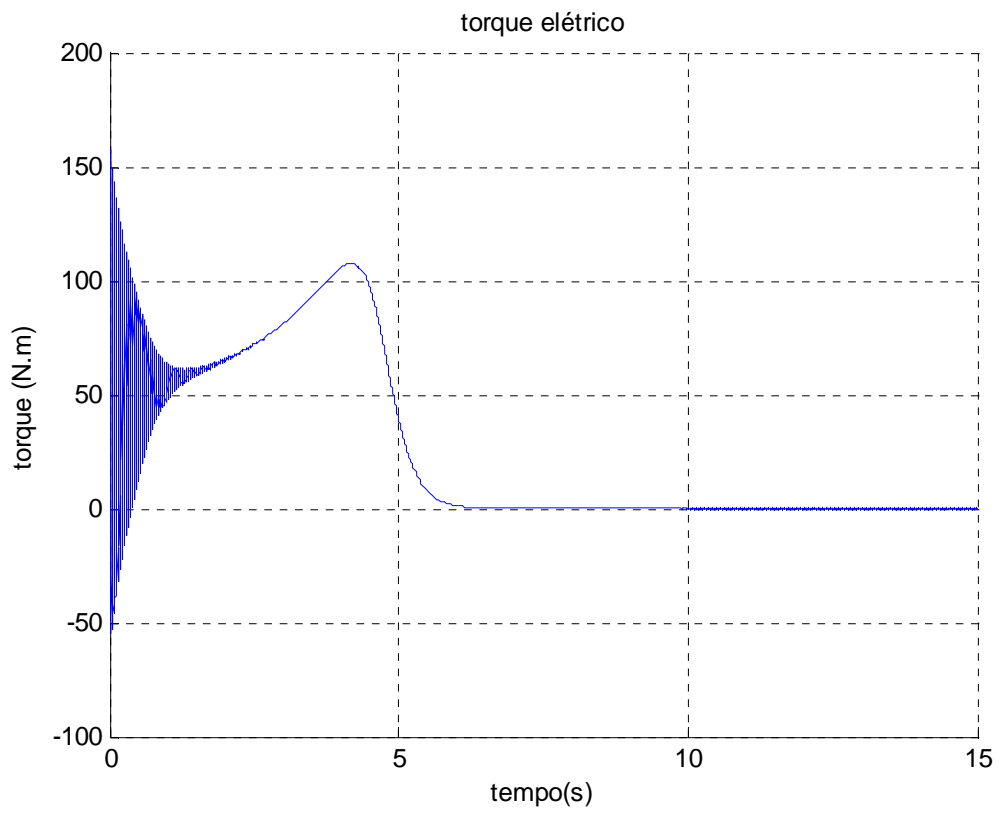


Figura 3.4 - Torque do motor assíncrono.

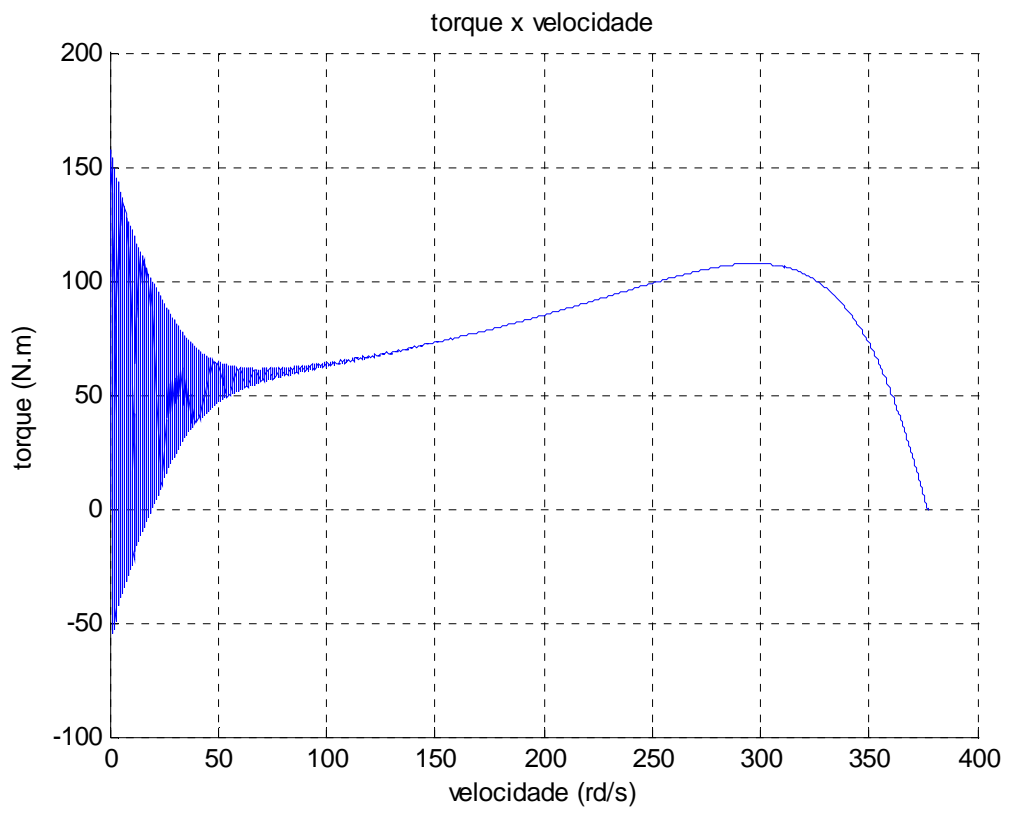


Figura 3.15 - Torque x velocidade.

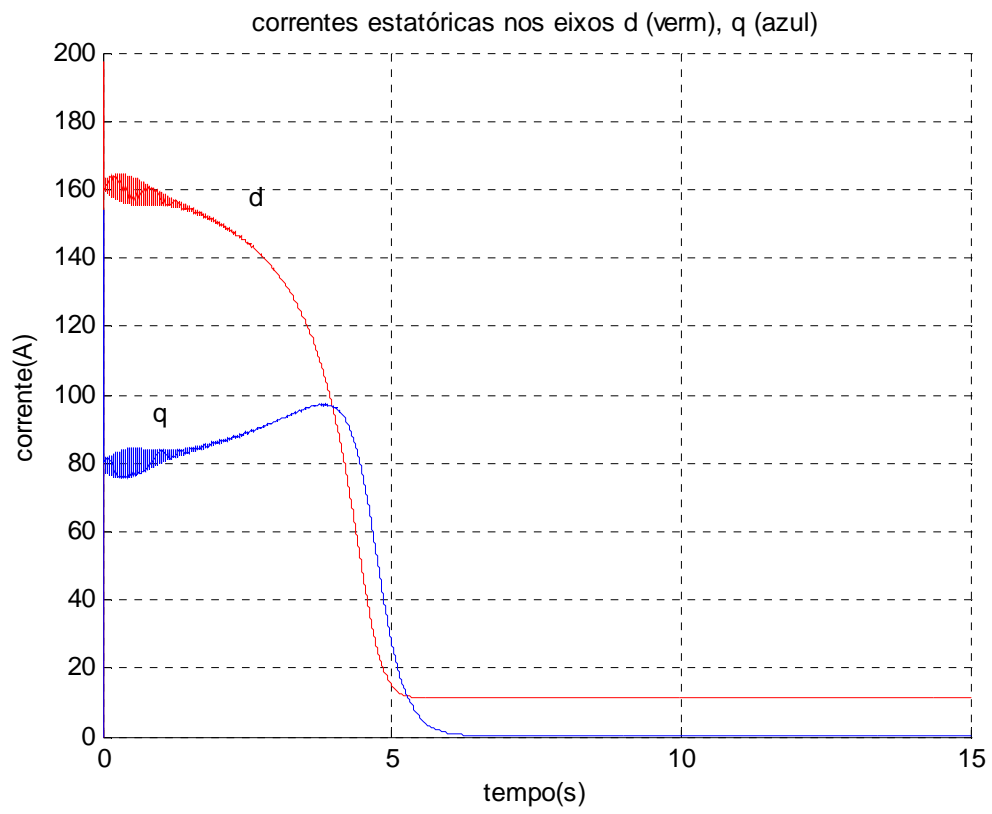


Figura 3.16 – Correntes estatóricas nos eixos d,q.

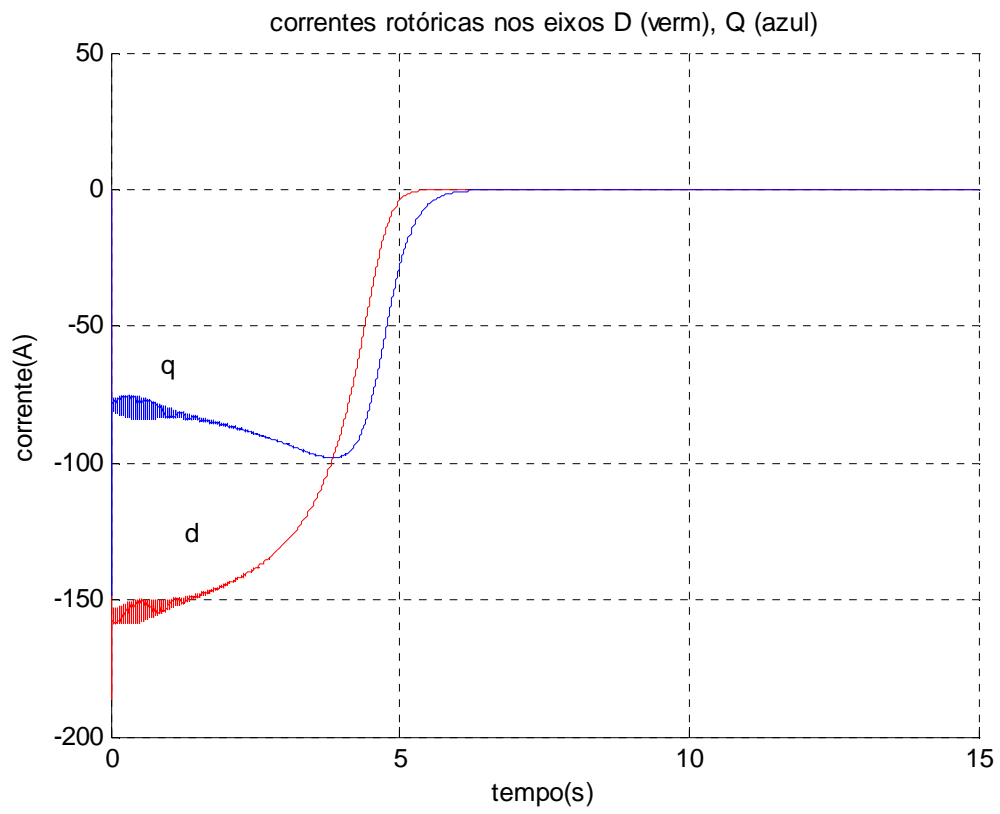


Figura 3.17 – Correntes rotóricas nos eixos D,Q.

3.1.2 Resultados obtidos com simulações, utilizando o programa ATP

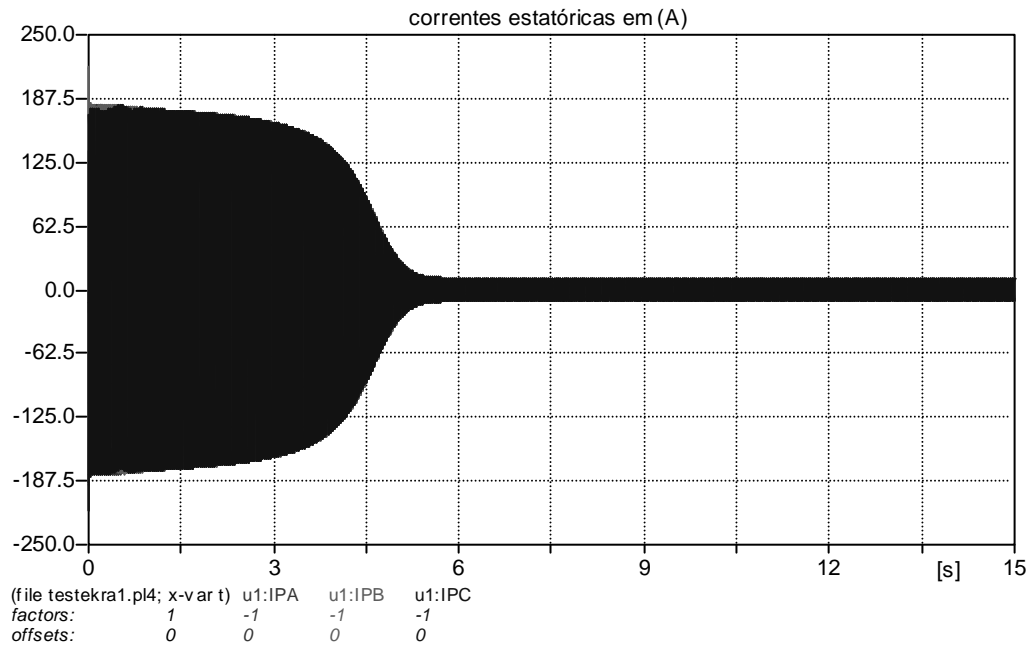


Figura 3.8 - Correntes nas fases A,B,C do estator.

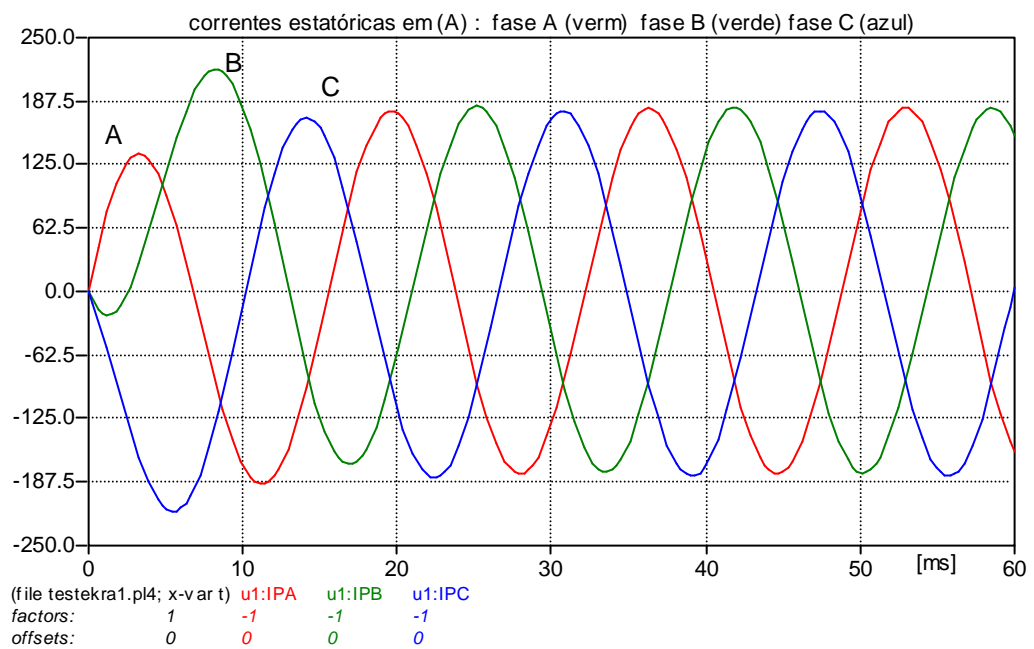


Figura 3.9 - Correntes nas fases A,B,C do estator (detalhe).

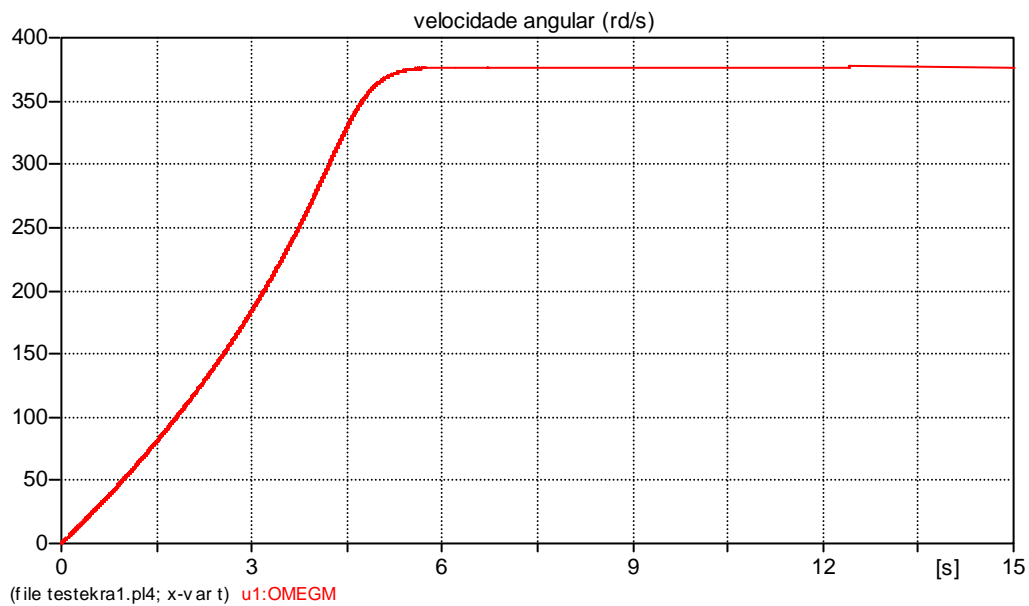


Figura 3.10 - Velocidade angular do motor assíncrono.

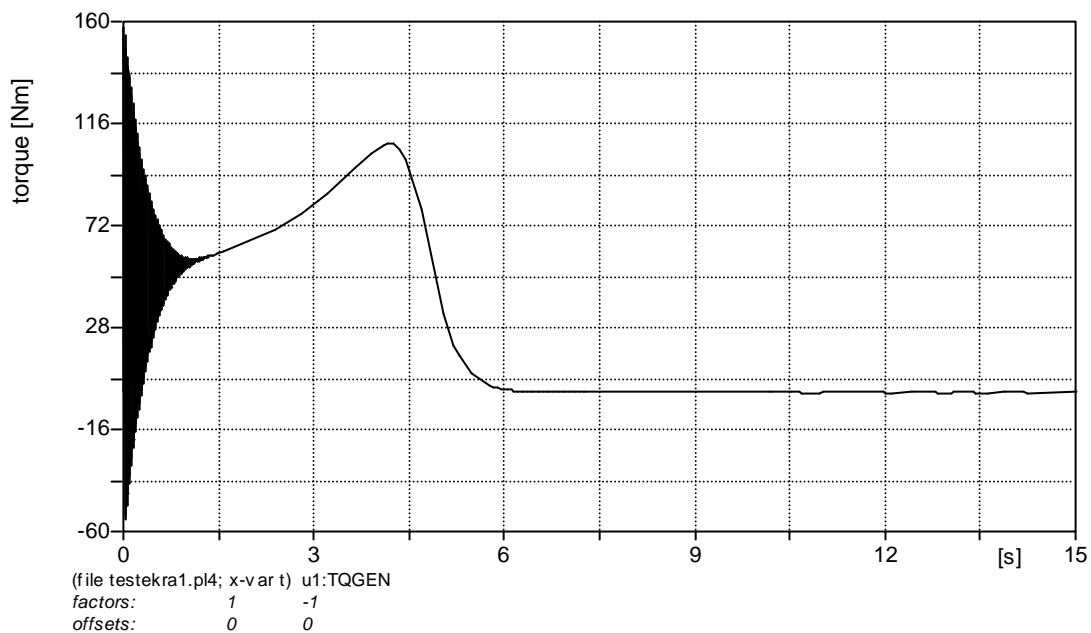


Figura 3.11 - Torque do motor assíncrono.

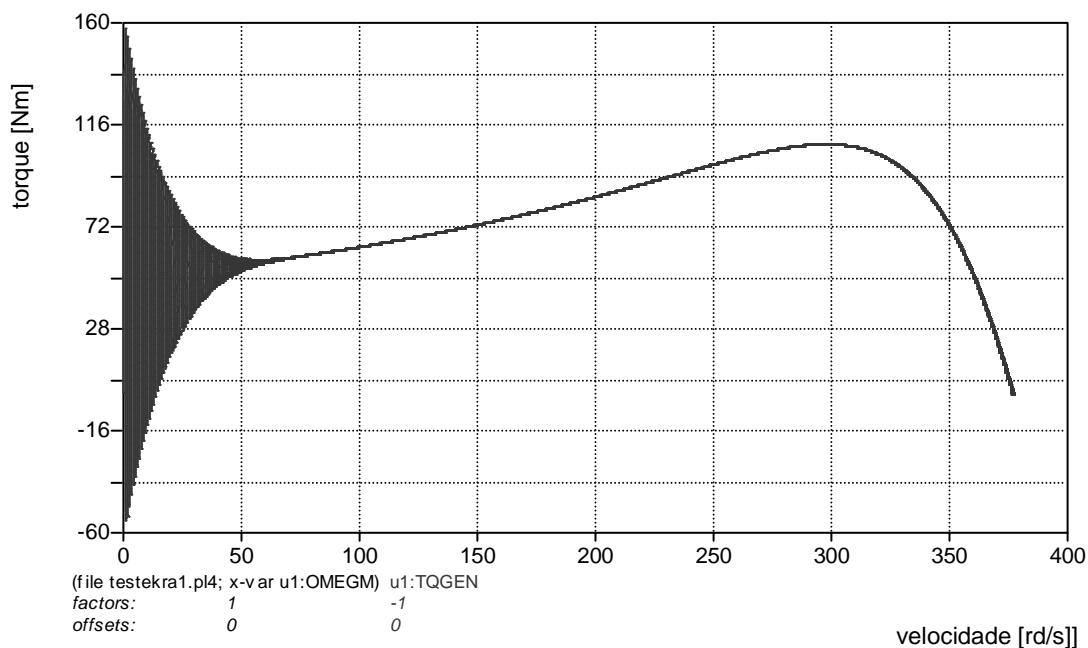


Figura 3.12 - Torque x velocidade no modelo do programa ATP.

3.2 Comentários

A simulação do motor assíncrono, com o programa desenvolvido, em comparação com a simulação utilizando o programa ATP, apresenta uma forte aderência de resultados, com formas de onda idênticas. Muito embora os modelos tenham formulações distintas, assim como sistemas de coordenadas diferentes e métodos de integração diferentes, os resultados coerentes conferem uma grande confiança aos modelos existentes no programa ATP.

No entanto, alguns comentários adicionais podem ser formulados. O modelo implementado no programa ATP não permite uma flexibilização da simulação do motor de indução em um sistema arbitrário de referência, já que o equacionamento é desenvolvido com eixo fixo no rotor. A modelagem da parte mecânica no modelo de ATP utiliza um análogo elétrico que não facilita a compreensão do fenômeno e a interpretação de grandezas mecânicas. Desse modo, a utilização do modelo desenvolvido facilitou a compreensão de vários aspectos, além dos mecânicos, relativos ao equacionamento transitório do motor assíncrono.

O modelo desenvolvido, embora utilizando o sistema de referência com velocidade síncrona, permite alterações para qualquer outro sistema de coordenadas, o que poderá ser realizado em trabalhos futuros, aprofundando a análise de variáveis internas do rotor.

Foram analisadas diversas variáveis e, embora outras representações gráficas pudessem ser apresentadas, julga-se que as curvas anteriores, tradicionais na análise de motores assíncronos, sejam suficientes para demonstrar a validade das comparações efetuadas entre modelos. De posse de uma representação de motores assíncronos bem fundamentada no programa ATP, foram examinados diversos casos operativos com este programa, face às suas disponibilidades intrínsecas de outros modelos de componentes do sistema elétrico, a serem apresentados a seguir.

4 RESULTADOS PARA UMA INSTALAÇÃO DE GRANDE PORTE

O objetivo das análises apresentadas neste capítulo é avaliar o impacto de sobretensões temporárias [23,24,25], causadas por abertura de linhas no lado de alimentação, sobre uma instalação composta por um conjunto de grandes motores. A hipótese analisada é a de abertura do lado fonte, permanecendo o disjuntor do lado carga conectado por um determinado período de tempo, em condições operativas nas quais a linha esteja operando com e sem compensação reativa.

Procura-se efetuar um maior detalhamento da representação dos motores assíncronos e também de saturações de motores e transformadores conectados ao nível de tensão de 13,8 kV. Desse modo é possível analisar o montante de compensação reativa, da linha de transmissão, necessário à operação segura da rede elétrica com esta configuração.

O caso analisado, conforme o diagrama unifilar abaixo indicado, corresponde a uma grande instalação industrial alimentada radialmente por uma linha de transmissão de 230 kV.

Os resultados a seguir são obtidos por meio do programa ATP, cujos resultados de simulação de motores foram confrontados no capítulo 3 com o modelo de motor de indução desenvolvido neste trabalho.

Nesta etapa, utilizando os recursos avançados do programa ATP, é feita uma análise considerando outros componentes da carga, correspondentes a um conjunto de motores síncronos e assíncronos, representados com suas saturações, pára-raios e não linearidades de motores e transformadores, presentes no detalhamento da representação desta carga de elevada complexidade. Dessa forma, o programa ATP configura-se como a ferramenta adequada para os estudos de transitórios eletromagnéticos na instalação em apreço.

Os dados referentes aos equipamentos presentes na rede elétrica estudada estão apresentados no anexo A.

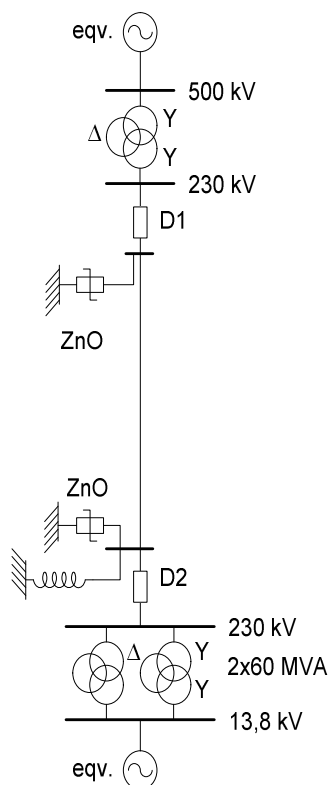


Figura 4.1 Sistema em 230 kV alimentando o conjunto de motores em 13,8 kV.

4.1 Casos avaliados

Conforme menção anterior, no sentido de se avaliarem as sobretensões durante a abertura dos disjuntores D1, indicados na figura 4.1, foi realizada uma série de ensaios procurando investigar inicialmente as sobretensões no sistema, quando a linha opera sem reatores, ou seja, verificando a possibilidade operativa do sistema em uma situação de emergência, em que a compensação reativa estivesse fora de operação, por exemplo em manutenção, ou até mesmo analisando a real necessidade de aquisição do reator e unidades de reserva.

Dessa forma, foram analisadas diversas situações, resumidas na tabela 4.1, considerando alguns detalhes de representação da rede elétrica, que pudessem contribuir para uma redução ou elevação de sobretensões.

Para uma maior compreensão da tabela, deve-se lembrar que a transformação de 230 kV para 13,8 kV é feita por duas unidades de transformação, cada uma com 60 MVA, perfazendo uma potência total de 120 MVA. O detalhamento das unidades de transformação leva em conta o efeito da saturação do transformador, procurando

investigar o seu efeito nas sobretensões. Procura-se também investigar o efeito das saturações de motores e transformadores, existentes no nível de tensão de 13,8 kV, cujo efeito, combinado com os transformadores de 230 kV, pudesse interagir com as capacitâncias da rede, avaliando-se desta forma a contribuição dos reatores na compensação de parte do efeito capacitivo da linha de transmissão. Cabe salientar que normalmente, em um sistema de transmissão, não é usual levar em conta a saturação como recurso de controle de sobretensões [28,29], pois embora isso possa ocorrer, o efeito preponderante a ser avaliado é a sobre-excitação dos transformadores e impacto no isolamento da instalação. No entanto, no caso particular de uma carga alimentando transitoriamente a linha de transmissão, sendo esta usualmente representada por elementos passivos, cogitou-se em considerar este efeito, adicionado a outros fatores passivos, como perdas, no amortecimento das sobretensões, lembrando que o lado fonte estaria desligado, o que por si já representa uma condição menos severa. Por outro lado, uma análise mais conservativa não deveria tomar como base o efeito de saturações para controlar as sobretensões.

Foram consideradas aberturas da linha em condições de faltas e também de aberturas por falhas operativas ou de atuação indevida da proteção. Desse modo, as aberturas do disjuntor D1 são investigadas diante dessas possibilidades, analisando o efeito de faltas no processo de abertura da linha.

São também investigados os efeitos de pára-raios de óxido de zinco (ZnO) no controle das sobretensões, ou mesmo se estes poderiam se danificar pela absorção elevada de energia, causada pelas sobretensões. Finalmente, avalia-se o efeito de uma pequena carga ativa de 10 MW operando na subestação, representando um conjunto de motores acionados por inversores.

Foram avaliados os seguintes casos, sem a presença do reator de linha e com a presença dos motores síncronos:

caso	Descrição
1	Sem falta, sem ZnO, transformador 2x60MVA
2	Sem falta, sem ZnO, transformador 2x60MVA, carga 10 MW
3	Sem falta, sem ZnO, transformador 2x60MVA, sem saturação no motor
4	Sem falta, com ZnO, transformador 2x60MVA
5	Sem falta, com ZnO, transformador 2x60 MVA, carga 10 MW
6	Sem falta, sem ZnO, transformador 1x60MVA
7	Sem falta, sem ZnO, transformador 1x60 MVA, carga 10 MW
8	Sem falta, com ZnO, transformador 1x60 MVA
9	Com falta Início, sem ZnO, transformador 2x60 MVA
10	Com falta Início, com ZnO, transformador 2x60MVA
11	Com falta Fim, sem ZnO, transformador 2x60MVA

Tabela 4.1 – Resumo dos casos simulados, sem reator e com motores síncronos.

4.1.1 Detalhamento da Carga.

Os caso analisados consideram a modelagem dos seguintes motores

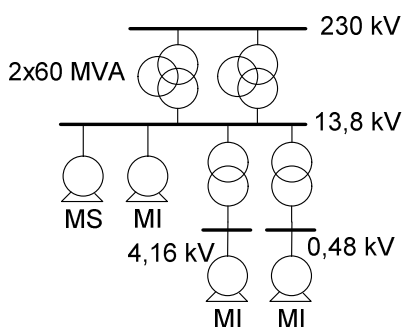


Figura 4.2 – Representação dos motores e unidades de transformação da subestação.

4.2 Resultados

A tabela 4.2 a seguir apresenta um resumo das sobretensões de manobra, obtidas nos casos analisados. A análise das sobretensões temporárias (sustentadas) para cada caso é feita nos comentários a respeito dos oscilogramas obtidos.:

caso	descrição	Sobretensão Máxima) (pu)
1	Sem falta, sem ZnO, transformador 2x60 MVA	2,18
2	Sem falta, sem ZnO, transformador 2x60 MVA, carga 10 MW	1,70
3	Sem falta, sem ZnO, transformador 2x60 MVA, sem saturação	2,0
4	Sem falta, com ZnO, transformador 2x60 MVA	1,65
5	Sem falta, com ZnO, transformador 2x60 MVA, carga 10 MW	1,54
6	Sem falta, sem ZnO, transformador 1x60 MVA	2,00
7	Sem falta, sem ZnO, transformador 1x60 MVA, carga 10 MW	2,00
8	Sem falta, com ZnO, transformador 1x60 MVA	1,70
9	Com falta Início, sem ZnO, transformador 2x60 MVA	1,37
10	Com falta Início, com ZnO, transformador 2x60 MVA	1,37
11	Com falta Fim, sem ZnO, transformador 2x60 MVA	1,00

Tabela 4.2 – Sobretensões na barra de 230 kV do final de linha (D1).

Os valores de sobretensões indicados na tabela referem-se ao valor máximo de sobretensão, obtido no período de estudo considerado, como um indicativo da severidade dos casos. No entanto a análise que se segue deverá levar em conta primordialmente as sobretensões sustentadas, que apresentam o impacto mais significativo na análise da compensação reativa do sistema elétrico [22,24].

Para os instantes antes da rejeição de carga, a potência mecânica do motor síncrono foi ajustada em 7 MW e a do motor de indução foi ajustada em 4,74 MW.

A tabela 4.3 apresenta os valores das impedâncias fornecidas para os motores de indução em outros níveis de tensão, em uma representação simplificada como um conjunto equivalente de motores de 4,16 kV e de 480 V, adotados com valores típicos. Os dados dos motores principais são apresentados no anexo A.

Motor	R estator (Ω)	L estator (H)	R rotor (Ω)	L rotor (H)
equiv. 4,16 kV	0,03095	0,000605	0,0517	0,000471
equiv. 0,48 kV	0,000663	0,00001291	0,001105	0,00001005

Tabela 4.3 – Impedâncias dos equivalentes dos motores de indução.

A seguir são avaliadas algumas condições de ocorrência da rejeição de carga para

os casos analisados da tabela:

4.2.1 Caso 1

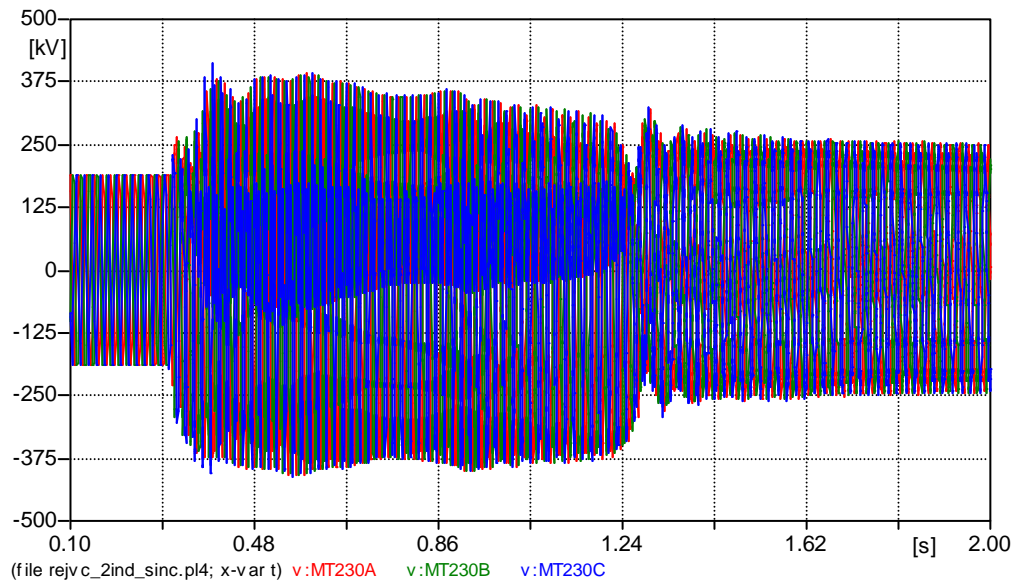


Figura 4.3 - Sem falta, motores operando: síncrono, motor de indução, motores 4,16kV (incluindo 0,48KV), com transformador abaixador de 2x60 MVA.

Inicialmente, foram considerados casos de aberturas sem falta, devidos a erros operativos, ou falhas na atuação da proteção. Estes casos apresentam uma probabilidade pequena de ocorrência, no entanto, sua consideração deve-se à importância da instalação

No caso 1, podem-se observar as elevadas sobretensões na subestação. Neste caso foram representadas as saturações de todos os motores e transformadores.

Os pára-raios não estão representados, estando presente grande parte dos motores da subestação, considerando fora de operação os motores acionados por inversores, cujo perfeito detalhamento não foi realizado neste trabalho, sendo representados de forma simplificada no caso 2.

4.2.2 Caso 2

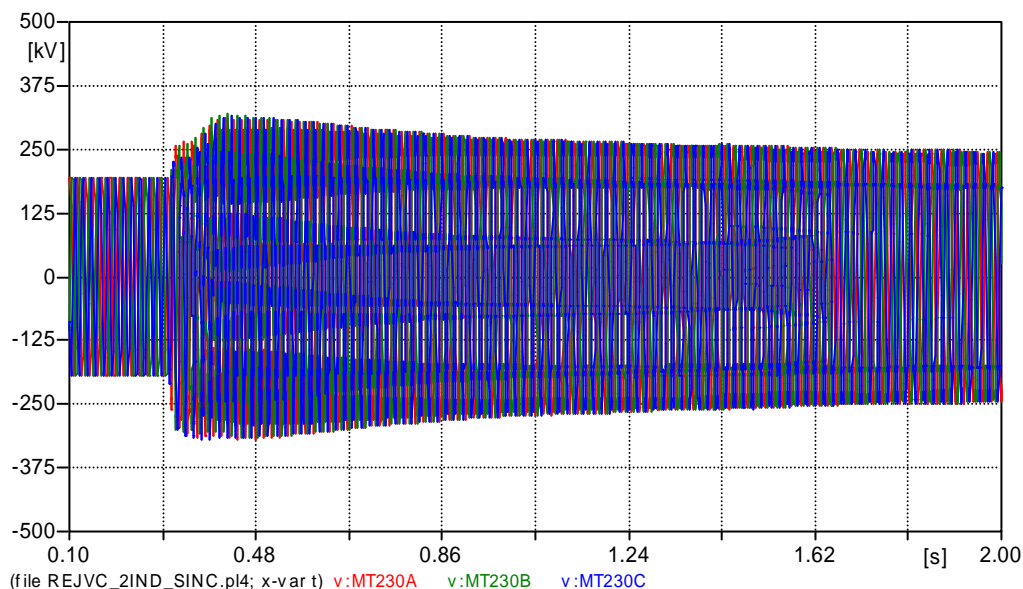


Figura 4.4 - Idem caso 1, com carga resistiva de 10 MW.

A presença da carga resistiva de 10 MW no barramento de 13,8 kV, procurando representar a potência ativa do conjunto de motores acionados com inversores, diminuiu a sobretensão máxima em 22% e a sobretensão sustentada significativamente. Como esta representação é muito simplificada, e merece um trabalho específico no seu detalhamento, embora o efeito seja bem significativo, entende-se que não é conveniente extrair conclusões definitivas a respeito das sobretensões encontradas, que podem estar sub-avaliadas em função da representação adotada.

4.2.3 Caso 3

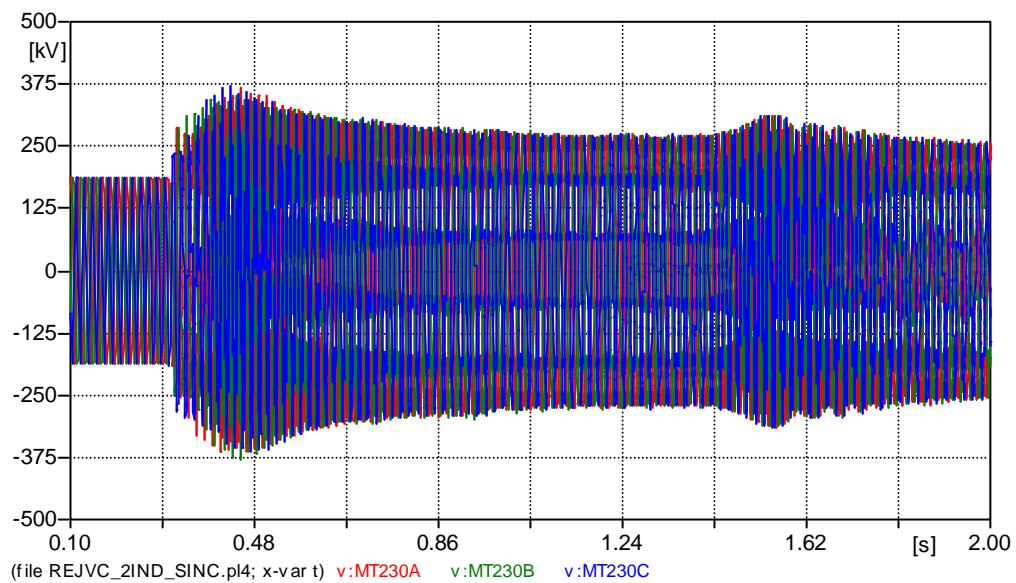


Figura 4.5 - Idem 1, sem saturações nos motores e nos respectivos transformadores abaixadores.

Nesse caso a sobretensão sustentada permanece com valores inicialmente elevados, com uma redução gradual no decorrer do tempo, em relação ao caso 1, com saturação. Com relação ao caso 1, verifica-se que a saturação tem o efeito de manter as sobretensões um pouco mais elevadas e durante um período de tempo maior, porém, a representação mais simplificada, sem saturação, já indica a severidade do caso operativo.

4.2.4 Caso 4

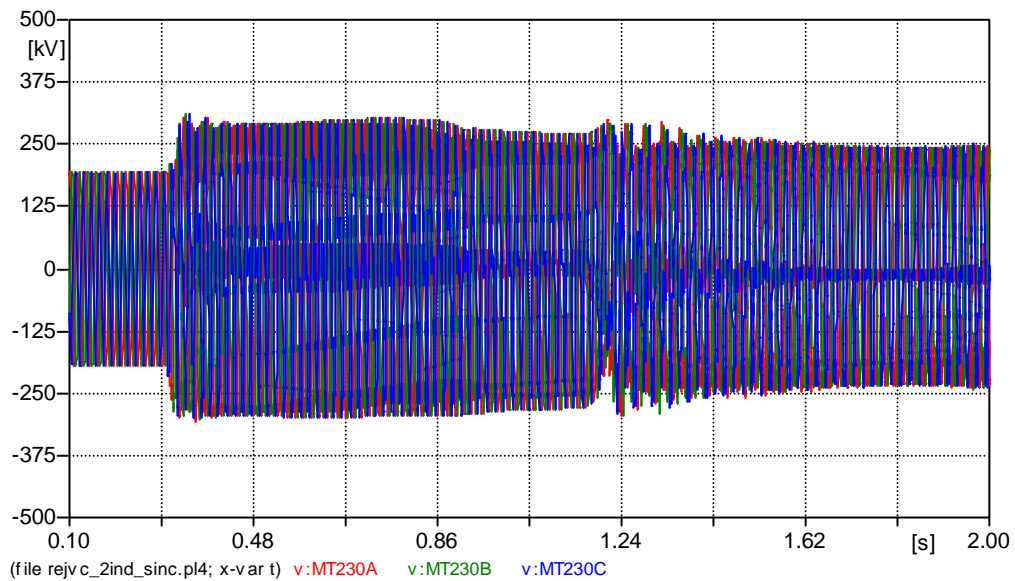


Figura 4.6 – Idem caso1, com representação de pára-raios de ZnO.

A representação das não linearidades introduzidas pelos pára-raios tem um efeito significativo no controle das sobretensões [25,26,27], no entanto, pela própria natureza da característica não linear da curva V_{xl} , as sobretensões sustentadas permanecem em um patamar relativamente elevado, em torno de 1,60 pu. No caso geral de sobretensões sustentadas é fundamental verificar as energias absorvidas, que podem ser proibitivas, sendo necessário avaliar das diversas condições operativas. Desse caso específico, verifica-se que as energias absorvidas pelos pára-raios são aceitáveis, no entanto, em uma condição mais severa, sem operação dos motores síncronos, poderiam ocorrer danos aos pára-raios. Neste caso, podemos eventualmente levar em conta a atuação da proteção de retaguarda, operando em um tempo estabelecido em torno de 500 ms para o disjuntor D2, o que atenuaria as solicitações de absorção de energia a partir deste instante.

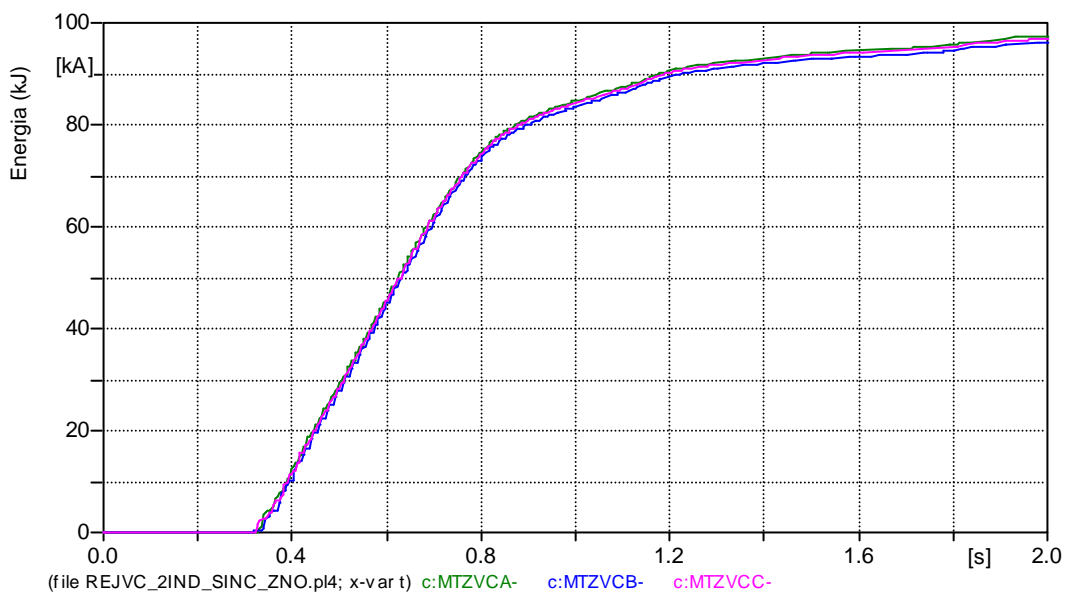


Figura 4.6a – Idem figura 4.6, com representação de pára-raios de ZnO. Energia nos pára-raios.

4.2.5 Caso 5

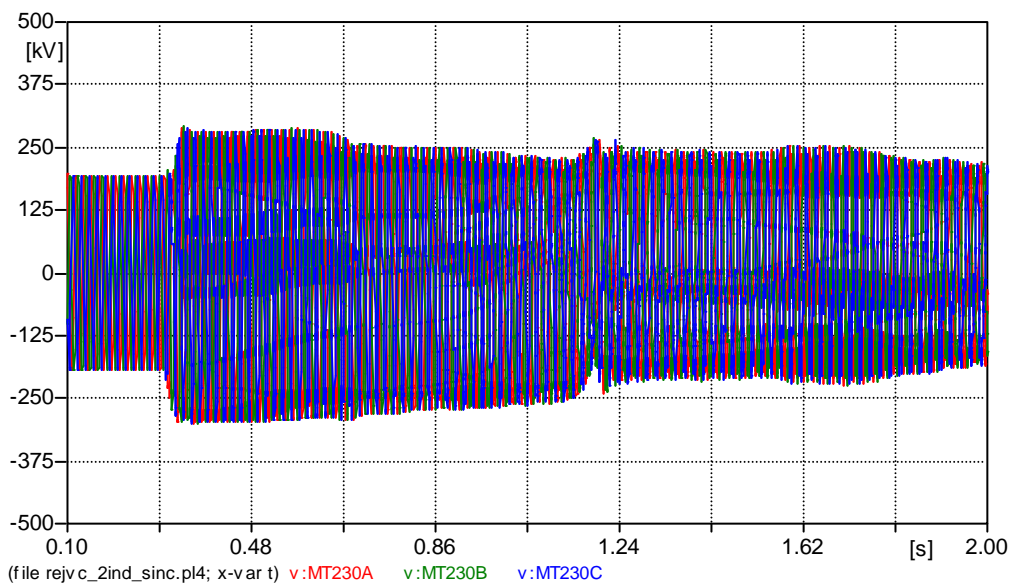


Figura 4.7 - Idem 5 com carga resistiva de 10 MW.

Este caso apresenta o efeito da carga de 10 MW, sobreposto com o efeito da simulação dos pára-raios, reduzindo a sobretensão máxima em 7% e a sustentada em uma proporção semelhante.

4.2.6 Caso 6

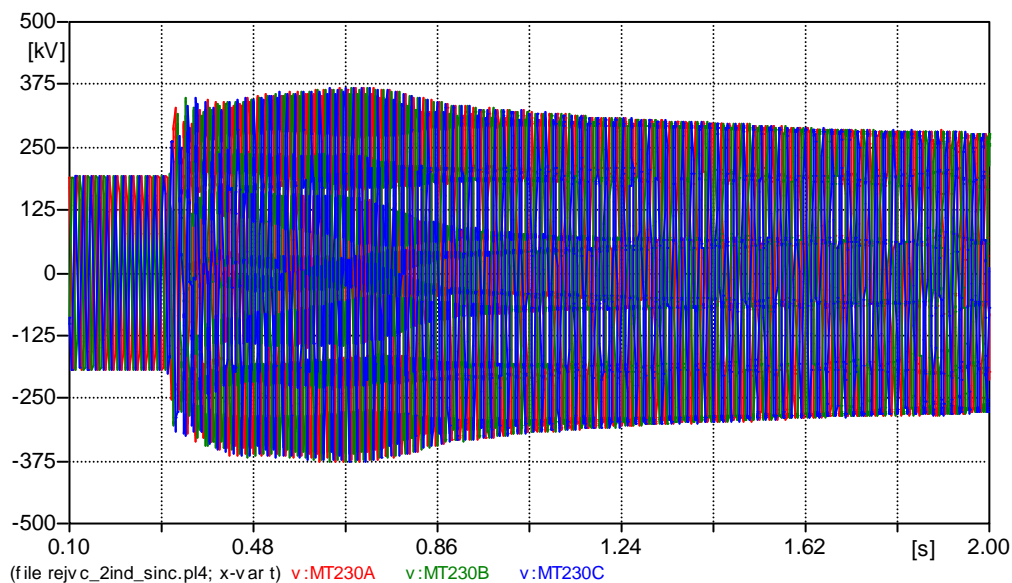


Figura 4.8 - Idem 1, com uma unidade do transformador abaixador de 60 MVA operando.

Em comparação com o caso de duas unidades operando, avalia-se neste caso a condição de apenas uma unidade de transformação com 60 MVA estar em operação. Verifica-se, embora com uma forma de onda um pouco diferente, que os resultados, do ponto de vista de sobretensões sustentadas são bem próximos ao caso com duas unidades operando, ou com níveis de solicitação ao isolamento dos equipamentos e pára-raios semelhantes.

4.2.7 Caso 7

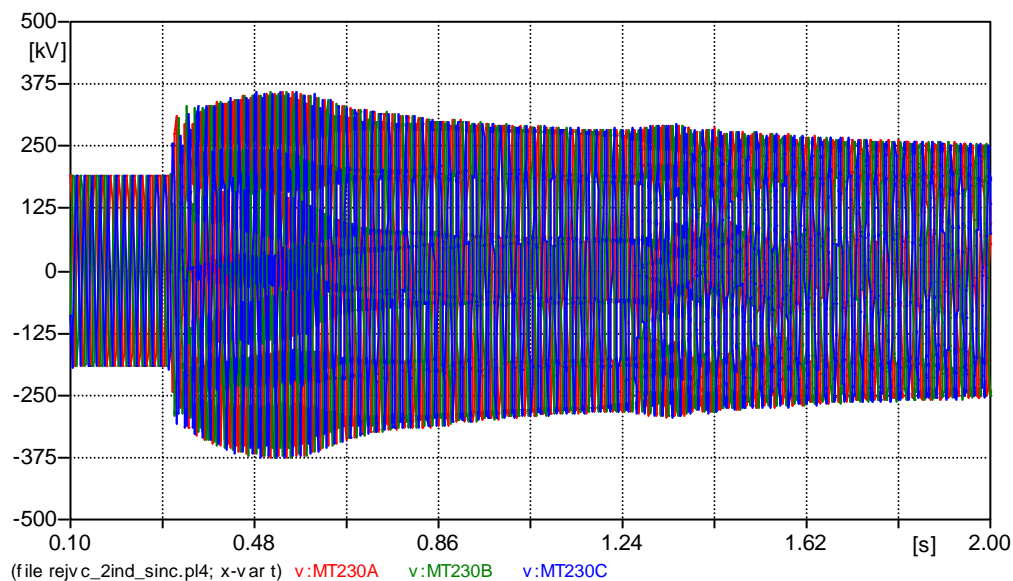


Figura 4.9 - Idem ao caso 6, com carga de 10 MW.

Nesse caso a carga de 10 MW apresenta um comportamento idêntico ao do caso 5, contribuindo para uma pequena redução inicial nas sobretensões, que vai se acentuando ao longo do tempo.

4.2.8 Caso 8

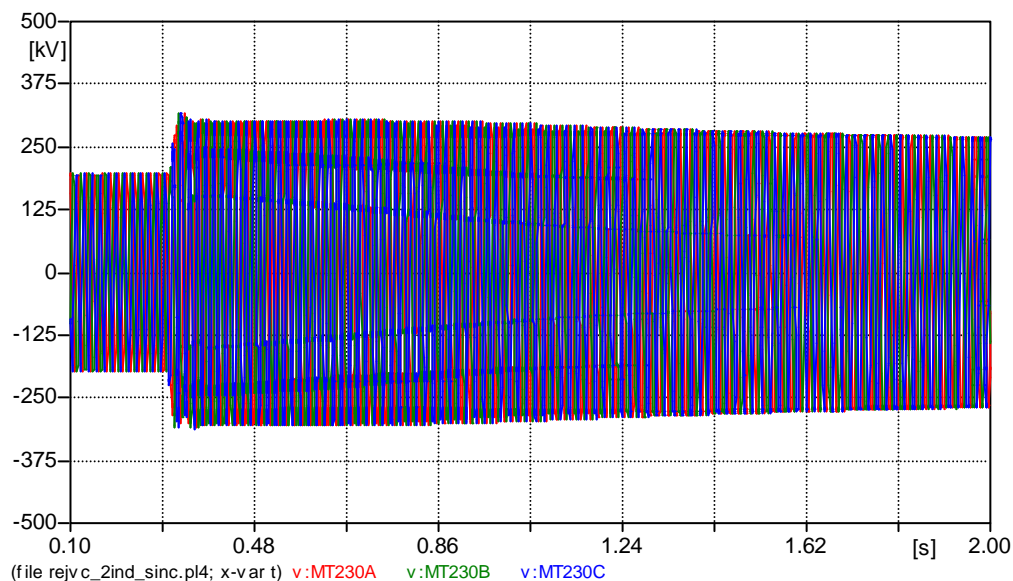


Figura 4.10 Idem caso 4, com transformador 1x60MVA.

4.2.9 Caso 9

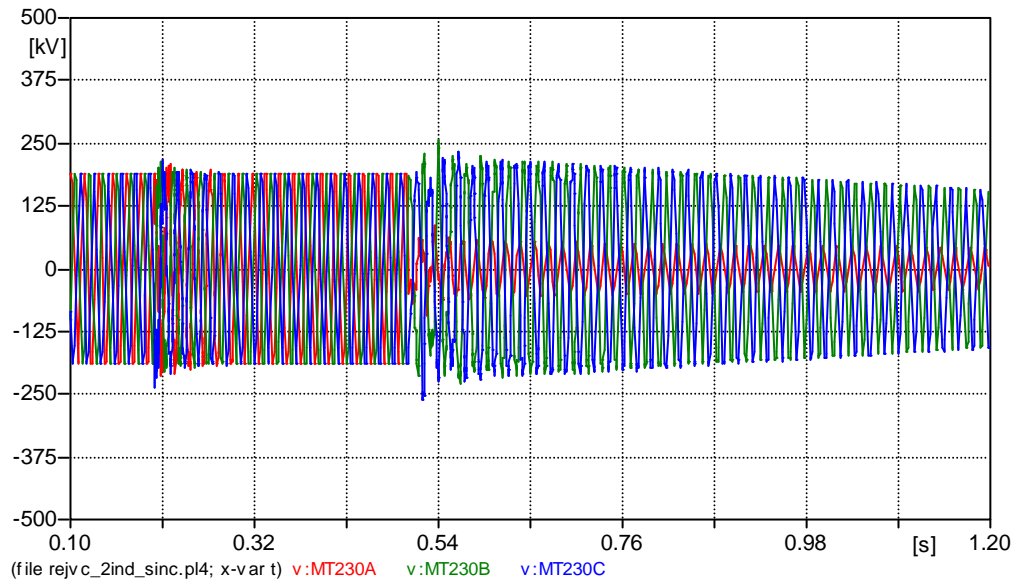


Figura 4.11 – Idem caso 1, com falta fase-terra no terminal alimentador (D1).

4.2.10 Caso 10

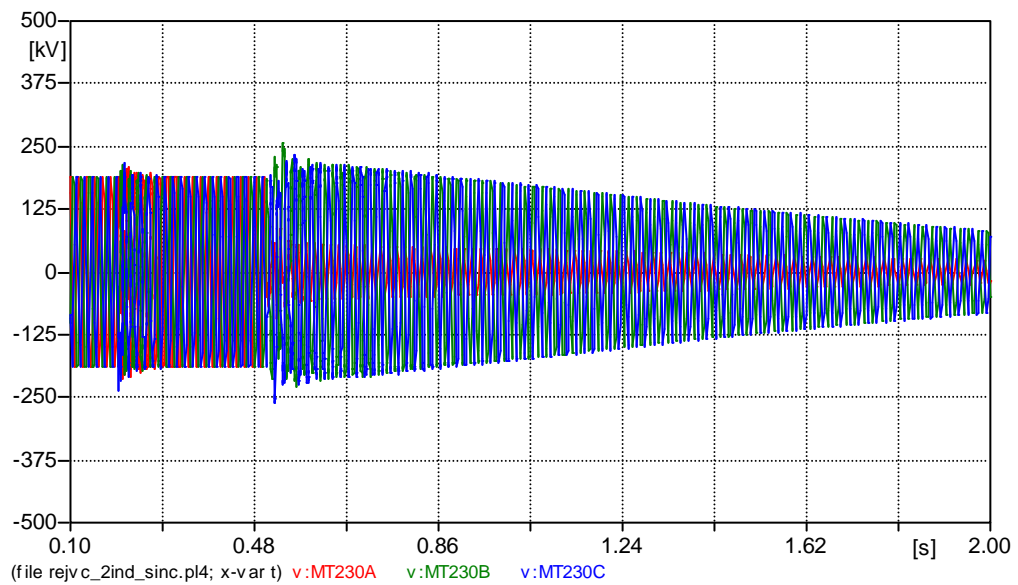


Figura 4.12 - Idem caso 9, com pára-raios.

4.2.11 Caso 11

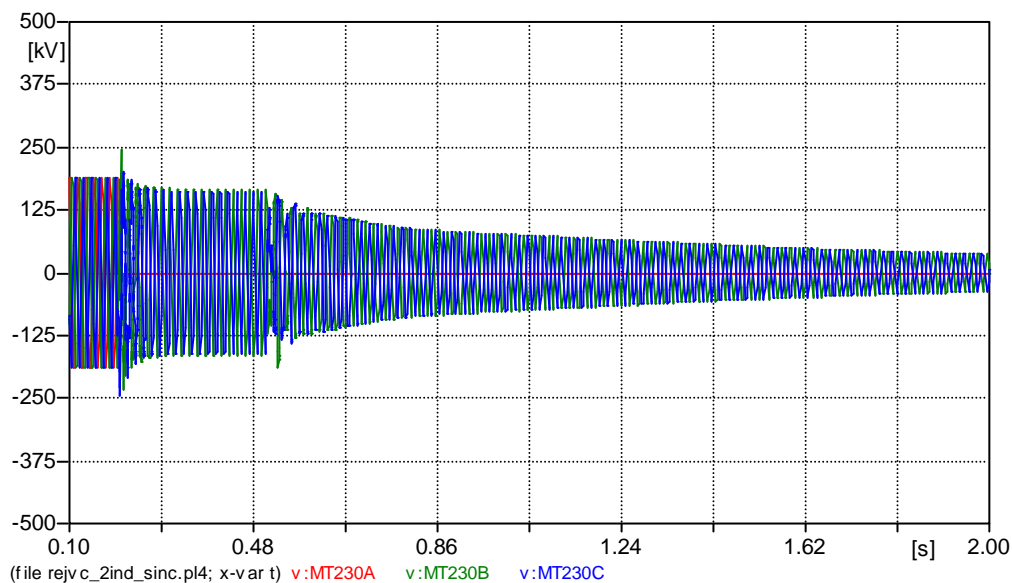


Figura 4.13 - Idem 1 com falta fase-terra no terminal da carga (D2).

Com relação aos casos analisados, 9, 10 e 11, verifica-se uma sensível redução nas sobretensões sustentadas, diante da ocorrência de curto-circuito na linha de transmissão, o que diminui o risco operativo na situação sem o reator de linha, podendo-se admitir que a proteção, com grande probabilidade, opere somente em condições de falta na linha e que não ocorram erros operativos nestas condições de emergência, por exemplo em períodos de manutenção do reator.

A tabela 4.4 a seguir apresenta casos quando estão presentes na subestação apenas motores de indução operando, o que configuraria uma situação mais crítica, já que haveria uma redução da potência de curto-circuito no sistema sem os motores síncronos. Os casos a seguir, de certa forma, são interessantes, pois utilizam apenas motores de indução e possibilitam analisar as sobretensões sustentadas e sua duração, causadas apenas por estes motores. Conseqüentemente, podem-se avaliar as solicitações ao isolamento do sistema elétrico.

caso	Descrição
12	Sem falta, sem ZnO, transformador 2x60MVA, sem reator
13	Sem falta, sem ZnO, transformador 2x60MVA, reator 30 MVar
14	Sem falta, sem ZnO, transformador 2x60MVA, reator 15 MVar

Tabela 4.4 – Casos simulados com e sem reator e somente com motores de indução

4.2.12 Caso 12

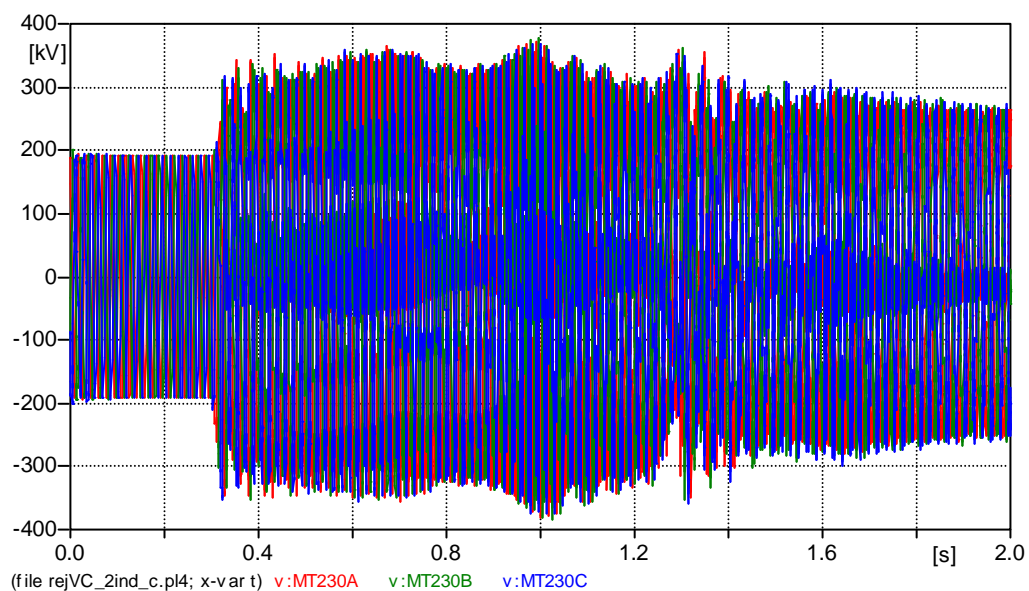


Figura 4.14 Caso com motor de indução, sem reator na linha.

O caso 12 apresenta sobretensões sustentadas ao sistema, da ordem de 1,7 a 1,9 pu, proibitivas para a operação do sistema nestas condições. Verifica-se ainda a capacidade do motor de indução em manter as sobretensões durante um período de tempo prolongado.

4.2.13 Caso 13

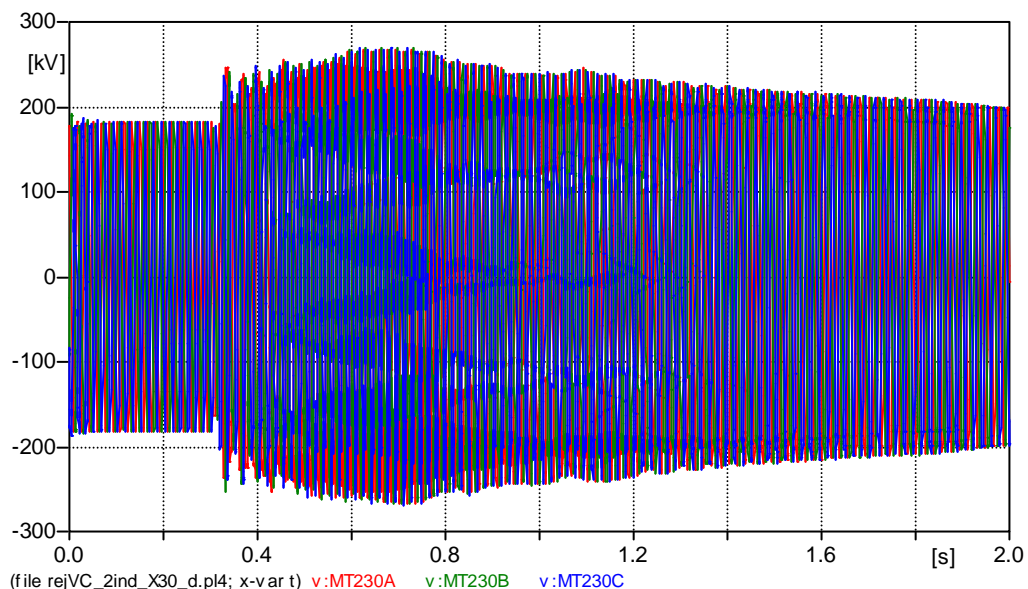


Figura 4.15 - Caso com motor de indução, com reator de 30 MVar na linha de transmissão.

O caso 13 demonstra a necessidade de compensação da capacitância da linha por reatores, neste caso dimensionados com uma potência reativa de 30 MVar. Nesta condição as sobretensões sustentadas situam-se em torno de 1,50 pu.

4.2.14 Caso 14

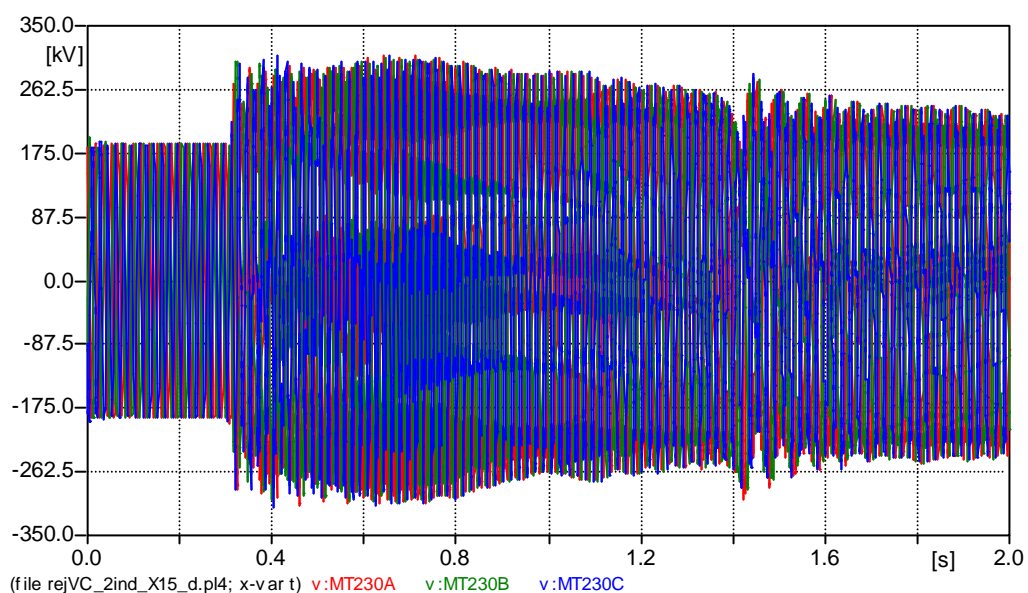


Figura 4.16 - Caso com motor de indução, com reator de 15 MVar na linha de transmissão.

O caso 14 apresenta a compensação reativa com reatores de 15 MVar, com sobretensões da ordem de 1,60 pu e com menor amortecimento do que no caso anterior.

Dos casos 13 e 14 verifica-se a necessidade dos reatores para a operação da planta. Lembra-se ainda que, com operação normal, estando presentes os motores síncronos, as sobretensões seriam ainda inferiores, evitando-se a sobre-excitação dos transformadores.

5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O objetivo principal deste trabalho foi o de investigar as sobretensões sustentadas durante aberturas do lado fonte, sobre cargas compostas por motores, alimentadas por linhas de transmissão. Tal aspecto ainda não foi devidamente investigado, provavelmente, sob a suposição de que a carga apresentaria um comportamento predominantemente amortecedor nestas sobretensões, sendo que, freqüentemente a representação da carga é feita por meio de circuitos puramente passivos.

Como orientação deste trabalho, foi feita uma avaliação do comportamento dinâmico dos motores assíncronos nesta condição operativa, o que conduziu a uma análise específica de um caso hipotético, porém próximo da realidade de algumas instalações de grande porte, constituída por motores síncronos e assíncronos. Fez parte desta avaliação a verificação da necessidade de compensação reativa da linha de transmissão para esta situação.

Nesta linha de investigação, foi realizado um maior detalhamento da representação dos motores assíncronos, do tipo gaiola. Inicialmente, com o desenvolvimento de um modelo com a decomposição das equações do motor segundo o eixo direto eixo de quadratura, particularmente construído para esta análise, foi possível efetuar comparações com modelos existentes em outros programas de simulação, como o existente no programa ATP.

Ainda que de forma simplificada, em um sistema reduzido e sem incluir as saturações, foram confrontados os resultados desse modelo com os obtidos com o programa ATP. Esta análise possibilitou um maior entendimento dos resultados dessas ferramentas, embasando e fortalecendo a confiança nos resultados obtidos com o programa ATP.

Cabe salientar que a análise de modelos recaiu prioritariamente sobre o comportamento diante de transitórios eletromagnéticos dos motores assíncronos, pois embora possam existir motores síncronos em operação, julgou-se que uma análise semelhante, de validação de modelos de máquinas síncronas, não seria necessária, em vista de uma larga experiência na utilização destes modelos, em grande parte utilizados no caso de geradores.

Com a finalidade de se avaliarem as sobretensões sustentadas, durante a abertura do lado da alimentação de uma linha de transmissão alimentando uma carga, composta por um conjunto de motores, foram examinadas diversas situações operativas, procurando investigar as solicitações dielétricas e de sobre-excitação de transformadores presentes no sistema. Para tanto, foram também analisadas condições com a linha operando com e sem reatores, ou seja, verificando também a possibilidade operativa do sistema se encontrar em uma situação de emergência, na qual a compensação reativa estivesse fora de operação, por exemplo, em manutenção, ou até mesmo contribuindo para se verificar a real necessidade de aquisição do reator e unidades de reserva.

Dessa forma, a rede elétrica e o conjunto de motores foram representados de forma minuciosa, analisando-se os diversos efeitos que pudessem contribuir para uma redução de sobretensões.

O detalhamento, das unidades de transformação e de acionamento, levou em conta o efeito da saturação do núcleo ferromagnético, verificando-se o seu impacto nas sobretensões e sua duração. Mesmo com o lado da fonte desligado, o que por si já representaria uma condição menos severa, verificou-se que o conjunto de motores é suficiente para causar sobretensões sustentadas e possivelmente sobre-excitação nos transformadores.

Foram consideradas aberturas da linha em condições de faltas e também de aberturas por falhas operativas ou de atuação da proteção. Foram também investigados os efeitos de pára-raios de óxido de zinco (ZnO) no controle das sobretensões.

Como fator atenuante destas sobretensões, verificou-se que a condição mais provável de abertura da linha, quando da eliminação de faltas, pela atuação natural da proteção, não levou a sobretensões perigosas, reduzindo, de certa forma, riscos na operação por curtos períodos de tempo e sem a presença dos reatores. Foi ainda constatado que, na situação do sistema operar apenas com os motores de indução, as sobretensões são significativas, demonstrando-se a possibilidade de danificação de equipamentos nas condições estudadas de falhas da proteção.

Como desenvolvimentos futuros, acredita-se que seria interessante representar com maiores detalhes outros tipos de acionamento de motores, como aqueles com alimentação pelos enrolamentos rotóricos (doubly fed) e as configurações em cascata subsíncrona, comumente utilizadas em acionamentos de moinhos. Como aspecto de interesse, cabe ainda investigar mais detalhadamente o acionamento de motores com a representação mais adequada de inversores, assim como o seu impacto nos fenômenos anteriormente mencionados, abordados neste trabalho.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Nikola Tesla. A new System of Alternate current Motors and transformers. American Institute of electrical engineers Transactions, vol 5, PP.308-307, sep 1887. Republicado nos Proceedings of the IEEE vol 72, n 2, pp 165-173, feb 1984.
- [2] C.P. Steinmetz, The alternating current induction motor. AIEE Transactions, vol 14 1897.
- [3] Balanço Energético Nacional 2008. Ministério de Minas e Energia. Brasil.
- [4] M.H. Kent, W. R. Scghmus, F. A. MaCrackin, L. M. Wheller. Dynamic Modelling of loads in stability studies. IEEE Transaction on PAS, may 1969.
- [5] B. K. Mathur The modeling of load characteristic representation in system studies. IEEE Transaction on industrial applications vol 20 n1 January/February 1984.
- [6] R. B. Adler, C. C. Mosher . Steady-State voltage Power characteristics for Power system loads. IEEE paper 70, CP 706, Power Systems.
- [7] O.Wasynczuc, Y. Diao, P.C.Krause, Theory and comparison of reduced order models of induction machines. IEEE Transaction on PAS, N3. march 1985.
- [8] B. C. Lesieutre, P. W. Sauer, M. A. Pai. Development and comparative study of induction machine based dynamic P, Q Load models. IEEE WM 94 166-9 PWRS.
- [9] E. W. Kimbark. Power systems stability: synchronous machines. New York. 1968.
- [10] F. Iliceto, A. Cheyhan, G. Ruckstuhl, Behavior of loads during voltage dips encountered in stability studies, Field and Laboratory Test. IEEE Transaction on PAS, November/ December 1972.
- [11] F. Iliceto A. Capasso Dynamic equivalents of asynchronous motor in system stability studies. IEEE Transaction on PAS VOL 93 January/February 1976.
- [12] Krause, P.C.,Wasynczuc, O., Sudhoff,S.D. Analysis of Electric Machinery. IEEE Press, 1995
- [13] Smith, I.R., Kar, A.K. Transient Performance of the Induction Motor –Proc. IEE

VOI.113, N.7, Jul 1966.

- [14] A.E. Fitzgerald, C Kingsley, S.D. Umans Electric Machinery, Mc Graw-Hill, 1983
- [15] J.R. Smith, M.J. Chen Three-Phase Electrical Machine Systems- computer simulation, Research Studies Press Ltd, 1993
- [16] Anderson, P. M. & Fouad, A. A. Power System Control and Stability. Piscataway, IEEE Press 1993.
- [17] Kundur, P. Power System Stability and Control. New York, McGraw-Hill, 1994.
- [18] ATP: Alternative Transients Program Rule Book. Leuven, K.U. Leuven EMTP Center, 1987
- [19] DOMMEL, H.W. Electromagnetic Transients Program Reference Manual: EMTP Theory Book. Portland, BPA, 1986
- [20] H.K.Lauw, W.S.Meyer, Universal machine modeling for the representation of rotating electric machinery in an electromagnetic transients program (EMTP). EMTP newsletter, vol. 5,n.2, pp.5-27, April 1985
- [21] D. Shirmohammadi, Universal machine modeling for electromagnetic transient program, Ontario Hidro memorandum, 1985
- [22] MILLER, T.J.E. Reactive Power Control in Electric Systems. New York, John Wiley, 1988.
- [23].IEC-71-1. Insulation Coordination. Part 1: "Terms, Definitions, Principles and Rules." Geneve, 1993.
- [24] IEC-71-2. Insulation Coordination. Part 2: "Application Guide." Geneve, 1996.
- [25] CIGRE. STUDY COMMITTEE 33. WORKING GROUP 10. "Temporary Overvoltages: Causes, Effects and Evaluation." In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING, Paris, 1990. (Proceedings, Paris, CIGRE, 1990, vol. 2, pp. 33.210/1-15.)
- [26] ELOVAARA, J. et. al. "Metal oxide Surge Arresters in AC Systems Part III:

Temporary Overvoltages and Their Stresses on Metal Oxide Surge Arresters.”
Electra, n. 129, pp. 115-118, Jan. 1990

[27] IEC 99-5. Surge arresters. Part-5: “Selection and Application Recommendations.” Geneve, 1996.

[28] FURNAS. Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento: Aplicação em Sistemas de Potência e Alta Tensão. Rio de Janeiro, UFF, 1987.

[29] L.C. ZANETTA. Transitórios Eléctromagnéticos em Sistemas de Potência. EDUSP 2003

[30] Penteadó, A.A. Estudo do comportamento dinâmico de motores assíncronos de grande porte , Dissertação de Mestrado, EPUSP, 1978

[31] MathWorks, MATLAB, High-Performance Numeric Computation and Visualization Software :Reference Guide. Imprensa Natick, Mass, 1992.

7 ANEXO A

7.1 Dados do motor síncrono

O motor síncrono foi simulado sem a representação do regulador de tensão e sem curva de saturação.

Os dados do motor são os seguintes:

No. de Polos : 40

Potência : 9600 HP

Rotação : 180 rpm

Tensão : 13,8 kV

Frequencia : 60 Hz

No. de Fases : 3

Conexão do Estator : Y

|Reat.(pu) - $X_d = 1.40$ - $X_q = 0.93$ |

$X'_d = 0.48$ - $X''_q = 0.34$ |

$X''_d = 0.33$ |

GD2 Rotor (estim.): 216 ton.m²|

Corrente Nominal : 411

$T'_d = 0.864$ $T'_{do} = 2.5$ [1]|

$T''_d = 0.0076$ $T''_{do} = 0.011$ |

$T''_q = 0.010$ $T''_{qo} = 0.026$ |

7.2 Dados do motor de indução 13,8 kV

Os dados desse motor são:

No. de Polos : 6

Potência : 6500 CV

Rotação : 180 rpm

Tensão : 13,8 kV

Frequência : 60 Hz

No. de Fases : 3

Conexão do Estator : Y

Corrente Nominal : 252 A

$R_r=0.0193$ Ohms

$J=6354$ Kgm²

Gd²

7.3 Representação de saturações

Foram representadas as saturações do transformador de 230/13,8 kV (com potências de 60 e 120 MVA), transformadores de 13,8/4,16 kV e também dos motores de 13,8 e 4,16 kV.

A curva de saturação do transformador abaixador de 120 MVA possui joelho de 1,2 pu e reatância de núcleo de ar de 32%. A curva é apresentada a seguir:

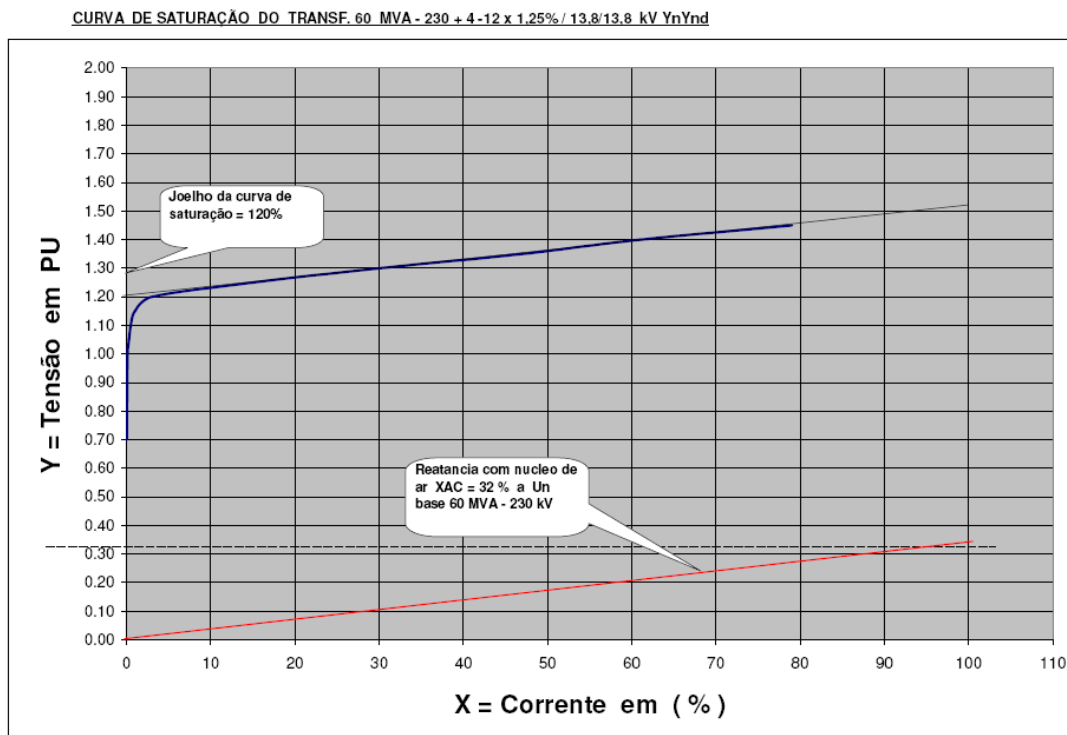


Figura A.1 - Curva de saturação do transformador abaixador.

7.4 Representação de pára-raios ZnO

Foram considerados pára-raios ZnO de 192 kV, classe 3, com a característica a seguir:

Curva Vxl

Mcov 152 kV

1 2 5 10 kA

381 396 429 452 kV

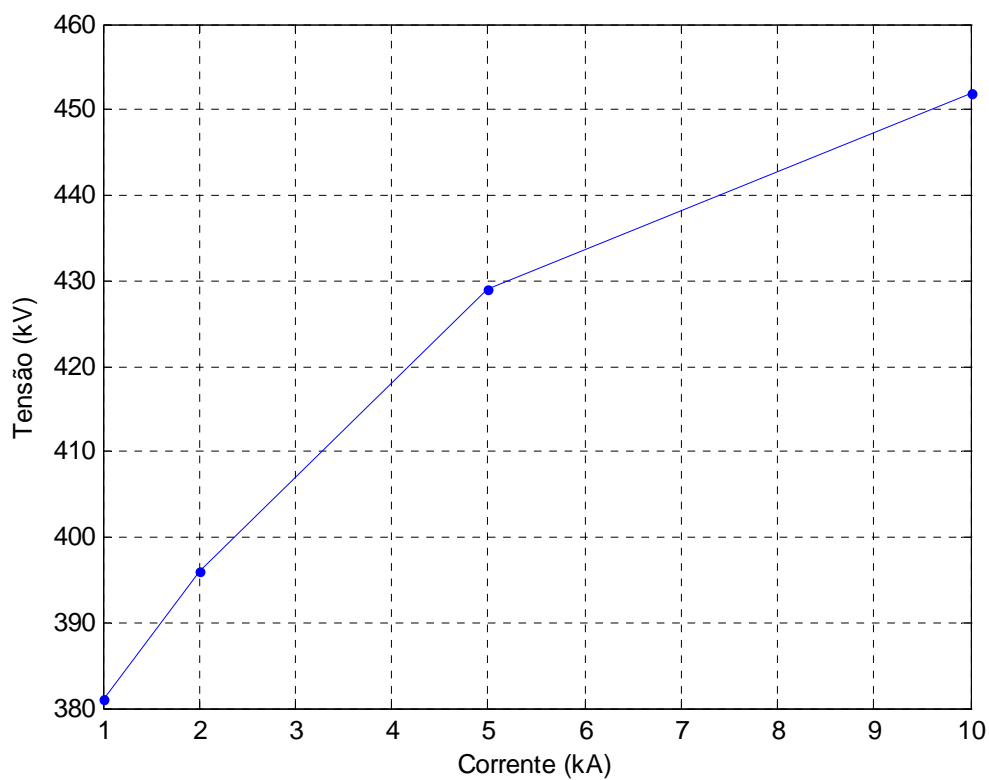


Figura A.2 – Curva do pára-raios ZnO.

7.5 Dados da linha de transmissão

r0: 0,38 (Ω/km)

x0: 1,10 (Ω/km)

y0: 2,14 (mS/km)

r1: 0,08 (Ω/km)

x1: 0,48 (Ω/vm)

y1: 3,43 (mS/km)

compr: 236 km