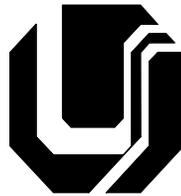


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO GERADOR DE
INDUÇÃO TRIFÁSICO ASSIMÉTRICO CONECTADO A UMA
REDE MONOFÁSICA – APLICAÇÕES RURAIS

Hamilton Dias de Carvalho

Junho

2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO GERADOR DE
INDUÇÃO TRIFÁSICO ASSIMÉTRICO CONECTADO A UMA
REDE MONOFÁSICA – APLICAÇÕES RURAIS

Hamilton Dias de Carvalho

Dissertação apresentada por Hamilton Dias de Carvalho à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Banca examinadora:

Luciano Martins Neto, Dr. (UFU) – Orientador
Darizon Alves de Andrade, Dr. (UFU)
Cláudio Lemos de Souza, Dr. (UFMT)

Uberlândia, 30 de Junho de 2006.

*A Deus, pelas oportunidades e eterna
presença em minha vida e a Nossa
Senhora Aparecida, pela constante
proteção e conforto.*

*Aos meus pais João e Madair (in
memorian), a minha querida esposa
Patrícia e aos meus filhos, pela paciência,
compreensão e incentivo, fundamentais
nos momentos mais difíceis.*

AGRADECIMENTOS

Ao professor Luciano Martins Neto pela orientação segura, confiança depositada e, principalmente, pela paciência e compreensão durante as etapas desafiadoras deste trabalho.

Ao meu compadre Prof. Antônio de Pádua e ao meu grande amigo Prof. José Mateus, que deram ajudas e contribuições imprescindíveis para o desenvolvimento desta dissertação.

Ao meu amigo e parceiro de trabalho Eudinei de Oliveira Silva pela força e amizade.

Aos professores José Antônio Lambert e Einstein Lemos de Aguiar, pelas perseveranças na coordenação do Mestrado Institucional, apesar das enormes dificuldades enfrentadas.

Aos colegas professores, laboratoristas e demais servidores do departamento de engenharia, pela amizade, discussão e incentivo.

A CAPES pelo apoio financeiro.

Resumo

Carvalho, H. D. Avaliação de Desempenho do Gerador de Indução Trifásico Assimétrico Conectado a uma Rede Monofásica – Aplicações Rurais FEELT-UFU, Uberlândia, 2006, 129 páginas.

O objetivo deste trabalho é obter o projeto e a construção de um gerador de indução trifásico assimétrico conectado a um sistema de distribuição de energia elétrica monofásica; visando aplicá-lo em áreas rurais. Este dispositivo, em face de sua robustez, baixo custo, menores requisitos de manutenção e bom desempenho, consiste numa alternativa bastante atrativa em relação às outras propostas existentes atualmente. O estudo teórico inicia-se através da elaboração de uma modelagem matemática para o sistema, no domínio da frequência, cujas equações são colocadas em função de um fator indicativo do nível de desbalanceamento, visando à obtenção de tensões balanceadas na carga. Para tanto, a modelagem matemática elaborada é implementada num simulador desenvolvido no programa Microsoft Excel. A partir desta implementação, são efetuados estudos de casos no sentido de evidenciar as potencialidades do gerador assimétrico conectado a cargas rurais. Os trabalhos computacionais são devidamente validados à luz de resultados experimentais extraídos de um protótipo de equipamento concebido, projetado e construído para fins deste trabalho.

Palavras-chave

Gerador de indução trifásico assimétrico, rede monofásica, fator de desbalanceamento, propriedades rurais, frequência constante, tensões balanceadas.

Abstract

Carvalho, H. D. Evaluation of Performance of the Assymmetrical Three-Phase Induction Generator Connected to Single-Phase Supply System – Rural Applications FEELT-UFU, Uberlândia, 2006, 129 páginas.

This work has for motive to obtain the project and build of an assymetrical three-phase induction generator connected to single-phase supply system, in order to be used in rural areas. This equipment has been presented as a better alternative in relation the others proposed more commercialized at the moment, due to its robustness, low cost, less maintenance requirements and excellent performance. Firstly, in the theoric part concerned to the system it is presented a mathematical representation, frequency domain mathematical model, whose equations are performed in function of an unbalance factor in order to obtain balance three-phase voltages in the system. Then, some simulations are performed in the simulator that was developed in the Microsoft Excel program. From these implements, it is carried out study cases to prove the assymetrical three-phase induction generator use potentialities. A prototype is projected and built, which experimental results are compared to the computer result.

Keywords

Assymetrical three-phase induction Generator, single-phase supply system, unbalance factor, country properties, constant frequency, balanced voltages.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO GERAL

1.1 – Considerações Iniciais.....	01
1.2 – Justificativas e objetivos.....	03
1.3 – Revisão Bibliográfica.....	06
1.4 – Estrutura da Dissertação.....	08

CAPÍTULO II – ESTUDO TEÓRICO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO TRIFÁSICA ASSIMÉTRICA FUNCIONANDO COMO GERADOR, LIGADO A UM SISTEMA MONOFÁSICO DE ENERGIA E ALIMENTANDO UMA CARGA TRIFÁSICA

2.1 – Considerações Iniciais.....	10
2.2 – Equações da máquina de indução trifásica assimétrica.....	11
2.3 – Gerador de Indução Trifásico Assimétrico alimentando uma Carga Trifásica – Fator de Desbalanceamento.....	26
2.3.1 – Desenvolvimento Matemático – Sistema de equações.....	28
2.3.2 – Fator de desbalanceamento.....	31
2.3.3 – Cálculo das tensões, das correntes e das potências no gerador.....	35
2.3.4 – Cálculo da tensão, da corrente e da potência no capacitor.....	39
2.3.5 – Cálculo da corrente, da potência e do fator de potência no sistema monofásico de alimentação.....	40
2.3.6 – Cálculo das tensões, correntes e potências na carga trifásica de impedância constante e Cargas de acoplamento.....	42

2.3.7 – Equações mecânicas.....	46
2.4 – Considerações Finais.....	48
CAPÍTULO III – PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO DO GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO ASSIMÉTRICO, E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO MODELO	
<hr/>	
3.1 – Considerações Iniciais.....	49
3.2 – Ensaio da máquina de indução trifásica simétrica.....	50
3.2.1 – Ensaio com o rotor em vazio.....	52
3.2.2 – Ensaio com o rotor bloqueado.....	55
3.2.3 – Medição da resistência do estator.....	58
3.3 – Cálculo dos parâmetros dos circuitos equivalentes – novo método.....	58
3.4 – Ensaio em carga.....	65
3.5 – Implementação computacional do modelo e projeto do gerador assimétrico.....	69
3.5.1 – Implementação computacional.....	70
3.5.2 – Projeto do gerador assimétrico.....	72
3.5.2.1 – Simulação do gerador de indução assimétrico sem carga.....	73
3.5.2.2 – Simulação do gerador de indução trifásico assimétrico tendo como carga lâmpadas de vapor de sódio.....	79
3.5.2.3 – Construção do protótipo.....	99

3.6 – Considerações Finais.....	101
CAPÍTULO IV – ENSAIOS EXPERIMENTAIS DO PROTÓTIPO DO GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO ASSIMÉTRICO	
<hr/>	
4.1 – Considerações Iniciais.....	102
4.2 – Ensaio do gerador de indução assimétrico em vazio.....	103
4.3 – Ensaio do gerador trifásico assimétrico com carga.....	105
4.3.1 – Gerador assimétrico alimentando lâmpadas de vapor de sódio.....	105
4.3.2 – Gerador assimétrico alimentando lâmpadas de vapor de sódio com carga de acoplamento em paralelo.....	107
4.4 – Considerações Finais.....	109
CAPÍTULO V – CONCLUSÕES GERAIS.....	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	115
ANEXOS.....	119

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL

1.1 - Considerações Iniciais

Até meados da década de 80 e, ainda, na de 90 a eletricidade não era disponibilizada, através do sistema convencional de redes de distribuição, para todo o meio rural sob a alegação de que esta atividade não era viável, principalmente, quando considerados aspectos técnicos e econômicos. A alta dispersão populacional; longas distâncias entre o ponto de origem da rede de distribuição e o ponto final de consumo; custo de investimento elevado, gerado pelo modelo de rede adotado pelas concessionárias; entre outros parâmetros técnicos e econômicos, geravam índices muito baixos, tais como número de consumidores por quilômetro, carga instalada por quilômetro, custo por quilômetro de rede, taxas de crescimento da demanda, retorno do investimento, etc., que não motivavam as concessionárias de distribuição de energia elétrica a realizarem eletrificação rural como era necessário. O resultado desta ação discriminatória é que até o ano 2000, o país apresentava um índice de eletrificação rural de, aproximadamente, apenas 30% [23].

Através da introdução da tecnologia “Sistema Monofilar com Retorno por Terra” – “MRT”, caracterizada por apresentar simplificações em materiais, estruturas, dispositivos de proteção e propiciar grandes vãos entre postes, obteve-se redução significativa de custos. Este é o sistema definido como prioritário para o atendimento de consumidores rurais no Programa Nacional de Eletrificação Rural “Luz no Campo”; programa este criado em dezembro de

1999 pelo Governo Federal com a coordenação do Ministério de Minas e Energia e suporte técnico, financeiro e administrativo da Eletrobrás.

Com uma linha de crédito de R\$ 1,77 bilhão, o programa visava levar energia elétrica a 1 milhão de propriedades rurais e proporcionar benefícios estratégicos para o desenvolvimento social e econômico do País, como geração de emprego e renda e possibilidades de utilização de fontes de energia renováveis e de equipamentos mais eficientes.

Do ponto de vista tecnológico, o programa contemplaria o atendimento das demandas no meio rural através de uma das 03 (três) alternativas: a) Extensão de Rede, b) Sistemas de Geração Descentralizada com Redes Isoladas e c) Sistemas de Geração Individuais.

O processo de eletrificação rural descentralizada, e por que não dizer dispersa, pode utilizar-se de tecnologias, disponíveis no mercado, que convertem energias de fontes renováveis em energia elétrica. Exemplos são os painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas, co-geração usando biogás, geração através de biomassa vegetal (cana de açúcar, biodiesel usando óleos vegetais, etc.), que, quando operando com grupos motor-gerador diesel, ou outro combustível, e dispositivos com boa eficiência, proporcionam confiabilidade, qualidade e segurança no fornecimento de energia elétrica.

Outra fonte de geração descentralizada, já há muito explorada nas propriedades rurais, é a hidráulica, para a qual o mercado nacional de equipamentos dispõe de unidades que contemplam de 1 kW (um quilowatt) a 30 MW (trinta megawatts), sendo assim classificadas, tecnicamente, de micro a pequenos aproveitamentos hidroenergéticos.

Desta forma, a agora tão notada característica de complementação entre a eletrificação rural descentralizada e a rede convencional de distribuição está completamente aceita, desde que baseada em critérios técnicos e econômicos muito claros.

É neste contexto que o *Gerador de Indução Trifásico Assimétrico* se apresenta, combinando a geração convencional com a descentralizada, se tornando uma alternativa economicamente viável para a geração de tensões trifásicas, senoidais e balanceadas, com frequência constante.

1.2 – Justificativas e objetivos

Para a escolha do tema do presente trabalho, inicialmente foram definidos critérios que permitissem o atendimento a premissas estabelecidas, de ordem técnica, econômica e social, e que o resultado da mesma pudesse ter aplicabilidade imediata, dada a sua influência na matriz de geração de energia elétrica a nível regional e nacional. A seguir, é feita breve descrição destas premissas.

- **Quanto à área do tema:** A área de Máquinas Elétricas Especiais, além de ser atual, é uma linha de pesquisa consolidada da Universidade Federal de Uberlândia.
- **Quanto à escolha da estrutura do sistema gerador:** A escolha da estrutura foi direcionada para aqueles consumidores que, em função das características do país/região, são atendidos por linhas monofásicas, tais como os consumidores de regiões rurais ou de áreas afastadas com baixa densidade de cargas, notadamente encontrados na região centro-norte do Brasil.

A rede monofásica, normalmente, pela sua pequena potência disponível devido à fragilidade do próprio sistema de eletrificação rural, atende apenas as cargas leves de uma propriedade rural, tais como os aparelhos eletrodomésticos, iluminação interna e motores de baixa potência. Neste caso, quando houver a necessidade de alimentar cargas mais pesadas, normalmente trifásicas, têm que se buscar outras alternativas.

Recondutorar a rede de suprimento, muitas vezes por vários quilômetros, passando-a de monofásica para trifásica, mostra-se uma alternativa economicamente inviável por demandar alto investimento no sistema da concessionária a ser realizado pelo consumidor.

Uma outra alternativa contempla o gerador trifásico como forma de geração de energia. Aqui, a máquina de indução com rotor tipo gaiola é freqüentemente comparada de modo favorável em relação aos demais tipos de máquinas elétricas por ser robusta, apresentar custos e manutenção reduzidos e possuir alta densidade de potência (W/Kg) [22]. Apesar de suas vantagens, a máquina de indução raramente é empregada como gerador, em operação isolada da rede elétrica, devido à sua regulação de tensão insatisfatória e a variação da freqüência síncrona, mesmo quando acionada sob velocidade constante no rotor e alimentando cargas com potência totalmente ativa [24,25].

Uma das vantagens da estrutura escolhida - *Gerador de Indução Trifásico Assimétrico ligado diretamente à rede monofásica*, é que a freqüência a ser estabelecida no sistema como um todo é a freqüência da própria rede; sendo assim, constante.

Portanto, este trabalho tem o objetivo de propor a utilização do gerador de indução trifásico, dito assimétrico, como uma alternativa de baixo custo em relação aos geradores síncronos empregados em sistemas de geração de baixa potência (abaixo de 50 kW). O sistema é adequado para ser empregado em propriedades rurais que disponham de fonte hídrica de energia e sejam alimentadas por linha monofásica. A potência nominal da linha monofásica deve permitir que toda a potência gerada possa ser absorvida pela rede, caso seja necessário; caracterizando um sistema de co-geração de energia elétrica.

Neste trabalho, o gerador de indução trifásico, dito assimétrico, é conectado a um sistema de distribuição de energia elétrica monofásica de baixa potência (típica de áreas rurais), alimentando dessa forma uma carga trifásica. A figura 1 ilustra o sistema proposto.

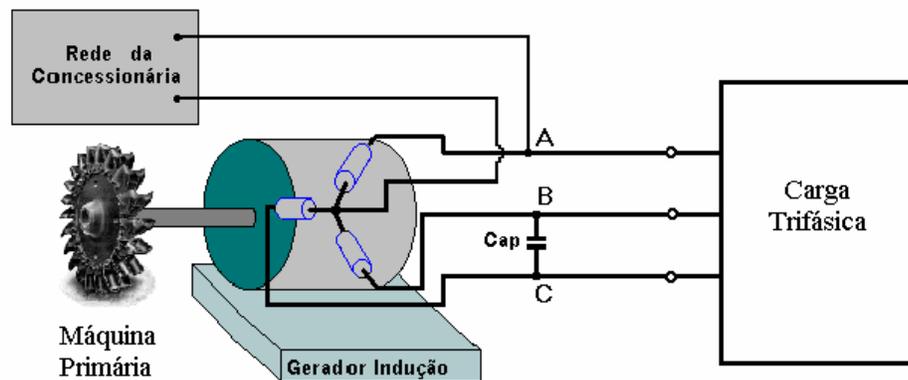


Figura 1 – Sistema proposto: Gerador assimétrico, rede monofásica, capacitor, carga trifásica e máquina primária.

Como o gerador de indução não é um gerador auto-excitado, é necessário excitar o estator através de uma fonte de tensão externa. Portanto, a tensão da rede será aplicada ao enrolamento da **fase A** do estator do gerador. No caso de uma carga resistiva, a potência que a rede fornecerá deverá ser aquela necessária apenas para a excitação do gerador, devendo a alimentação da carga ficar a cargo do gerador de indução.

O gerador assimétrico difere do gerador simétrico convencional apenas no número de espiras por fase, do estator. Esta característica do gerador assimétrico é que, juntamente com o capacitor (Cap) conectado entre os terminais **B** e **C** do

enrolamento do estator da máquina assimétrica, irá proporcionar tensões balanceadas à carga trifásica.

Para tanto, o trabalho tem como metas: a modelagem matemática, no domínio da frequência, do sistema formado pelo gerador de indução trifásico assimétrico, carga trifásica de impedância constante, máquina primária, capacitor permanente e rede monofásica. São efetuados ainda, ensaios experimentais para confrontar e validar o modelo implementado. Um programa computacional foi desenvolvido no Microsoft Excel, com o objetivo de simular o comportamento das grandezas envolvidas no processo.

Grande parte dos ensaios experimentais foi realizada na propriedade rural denominada **Estância Cocalinho**, localizada no município de Nossa Senhora de Livramento – MT. As principais características elétricas desta propriedade rural são apresentadas no **Anexo A** e fotografias das montagens, no **Anexo B**.

1.3 – Revisão Bibliográfica

O levantamento bibliográfico realizado para o desenvolvimento dos estudos foi feito em três etapas, sendo estas, de vital importância para o embasamento teórico de assuntos pertinentes ao trabalho realizado.

A primeira etapa abrangeu os aspectos relacionados com o gerador de indução convencional operando isolado da rede elétrica. Foi observado que esforços consideráveis têm sido empreendidos ao longo do tempo, com o objetivo de superar a regulação de tensão insatisfatória dos geradores de indução em operação isolada da rede elétrica. As diferentes alternativas de regulação de tensão concentram-se em estratégias de compensação de reativos. Estas estratégias empregam contactores, relés ou chaves semicondutoras na sua implementação; assunto encontrado nas referências [12], [24] e [27-29]. Mesmo com a melhoria do problema da regulação de tensão, a frequência síncrona permanece variável.

Num segundo momento, foram levantadas as referências que abordassem o gerador de indução convencional ligado a uma linha monofásica. As referências [30] e [31], por exemplo, propõem uma estrutura que utilizam a associação entre gerador de indução e inversor trifásico de tensão chaveado no modo PWM, a fim de fixar a frequência síncrona do gerador e compensar a potência reativa do sistema. Esta estrutura não utiliza regulador de velocidade, e toda potência produzida pelo gerador é adequadamente consumida, com o objetivo de manter regulada a tensão terminal do gerador; uma vez que a ausência de regulador de velocidade não permite o controle do valor da potência elétrica gerada. Assim, a linha monofásica serviria para enviar o excedente da energia gerada à rede.

Na referência [11] observa-se uma modelagem matemática no domínio da frequência. Observa-se que a modelagem foi feita considerando o *gerador simétrico* conectado a um sistema de distribuição de energia elétrica monofásica. Uma modelagem análoga ocorreu em [13], desta feita no domínio do tempo.

Foi na terceira etapa que se buscou os modelos matemáticos envolvendo a máquina de indução assimétrica. A linha de pesquisa acerca da máquina de indução trifásica assimétrica operando como motor está bem consolidada em trabalhos realizados, na sua grande maioria, na Universidade Federal de Uberlândia; dentre os quais se cita as referências de [1] a [10]. Especificamente, as referências [2] e [5] geraram importantes contribuições a este trabalho.

Vale salientar que em todas as pesquisas bibliográficas realizadas, somente a referência [21] tem correspondência direta com o tema deste trabalho. Nela, foi elaborada uma modelagem matemática no domínio do tempo envolvendo os transitórios elétricos e mecânicos.

Desta forma, fica evidente a importância deste trabalho no tocante a sua modelagem no domínio da frequência, em termos de valores médios.

1.4 – Estrutura da dissertação

Além deste capítulo introdutório, este trabalho envolve mais quatro capítulos, estruturados da seguinte forma:

CAPÍTULO 2 – Modelagem matemática:

Este capítulo é iniciado com a modelagem da máquina assimétrica, no domínio da frequência, utilizando-se as teorias do campo magnético e das componentes simétricas.

Na seqüência, através de análise de circuitos elétricos, são levantadas as equações das variáveis de tensão, corrente e potência, envolvidas no estudo. Estas variáveis são colocadas em função do fator de desbalanceamento; que é uma medida do nível de desbalanceamento das tensões fornecidas à carga trifásica.

CAPÍTULO 3 – Projeto e construção de um protótipo do gerador assimétrico e implementação computacional do modelo:

Neste capítulo são realizados os ensaios da máquina de indução trifásica simétrica, que vai atuar como o gerador assimétrico, visando levantar os parâmetros de seu circuito equivalente, objetivando as simulações e conseqüente construção do protótipo.

Os parâmetros dos circuitos equivalentes são calculados através de um método direto, novo; apresentado aqui.

É apresentado o programa computacional desenvolvido no MICROSOFT EXCEL, para efetuar as simulações computacionais necessárias ao estudo, possibilitando comparações com os resultados obtidos dos ensaios experimentais.

CAPÍTULO 4 – Ensaio experimentais do protótipo:

Aqui, de forma complementar ao capítulo 3, são mostrados os resultados dos ensaios experimentais realizados em laboratório e na propriedade rural.

Mostra-se o esquema de conexão e respectivos equipamentos utilizados na realização dos ensaios experimentais.

CAPÍTULO 5 – Conclusões gerais:

Neste capítulo são consolidadas as principais discussões e conclusões finais dos capítulos precedentes, apontando os aspectos mais relevantes encontrados na realização do trabalho.

Finalmente, são ressaltadas questões associadas às contribuições efetivas do trabalho e também elencados alguns tópicos correlatos e que certamente poderão constituir-se em temas para futuros desenvolvimentos.

CAPÍTULO II

ESTUDO TEÓRICO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO TRIFÁSICA ASSIMÉTRICA FUNCIONANDO COMO GERADOR, LIGADO A UM SISTEMA MONOFÁSICO DE ENERGIA E ALIMENTANDO UMA CARGA TRIFÁSICA

2.1 - Considerações Iniciais

As equações que modelam a máquina de indução trifásica assimétrica, no domínio da frequência, foram deduzidas e trabalhadas nas referências [2-5]. Para comodidade de leitura deste estudo, as deduções das referidas equações estão rerepresentadas no item 2.2, seguindo o desenvolvimento apresentado em [5].

Para o cálculo das grandezas elétricas e mecânicas do conjunto gerador assimétrico – rede monofásica – capacitor – carga trifásica – máquina primária, foi usado às linhas de raciocínio apresentadas em [2] e [5]. Estas grandezas foram colocadas em função dos valores de “b”, “c” e do capacitor (Cap) colocado entre os terminais **B** e **C** do enrolamento de estator da máquina assimétrica. Os fatores “ $b = N_a/N_b$ ” e “ $c = N_a/N_c$ ” representam respectivamente as relações entre o número de espiras da fase **A** pelo da fase **B** e entre o número de espiras da fase **A** pelo da fase **C** do estator da máquina. Variações nos valores de “b”, “c” e Cap possibilitam encontrar certas condições ótimas de projeto. Estas condições ótimas de projeto dizem respeito aos valores

das tensões de linha que alimentam uma determinada carga trifásica; os quais valores devem apresentar o menor nível de desbalanceamento possível.

2.2 – Equações da máquina de indução trifásica assimétrica.

Considerando o estator de uma máquina de indução trifásica em gaiola de esquilo, com N_a , N_b e N_c números de espiras por fase. Alimentando-o através de um sistema trifásico de tensões desbalanceadas \dot{V}_a , \dot{V}_b e \dot{V}_c , e considerando-o ligado em estrela (Y) ou em delta (Δ), conforme indicam as figuras (2.1.a) e (2.1.b), correntes \dot{I}_a , \dot{I}_b e \dot{I}_c circulam nas respectivas fases. Cada corrente produz uma distribuição de força magnetomotriz no entreferro da máquina. Estas forças magnetomotrizes estão localizadas espacialmente a 120° elétricos entre si, pois os enrolamentos foram mantidos nestas posições.

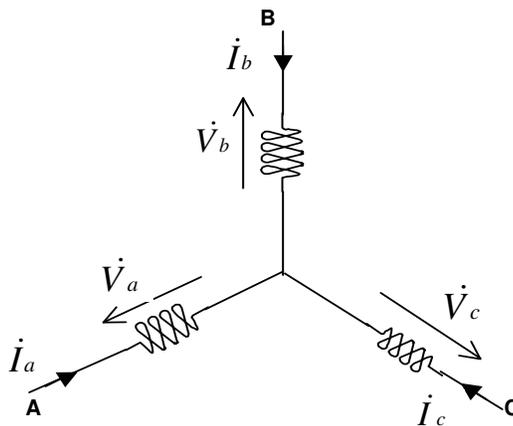


Figura 2.1.a – Enrolamento do estator em conexão “Y”

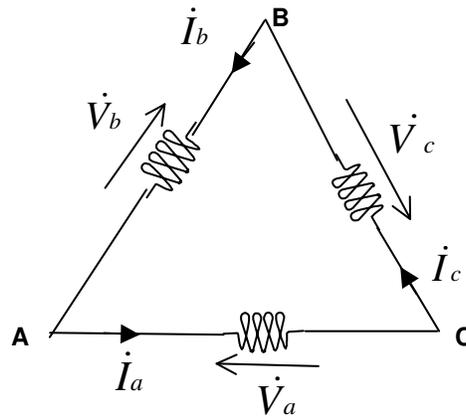


Figura 2.1.b – Enrolamento do estator em conexão “Δ”

No tempo, estas forças magnetomotrizes estão pulsando em fase com as correntes das respectivas fases. Considerando para efeito de análise, apenas a componente fundamental da distribuição espacial de cada força magnetomotriz, o valor máximo de cada uma delas fica proporcional ao produto do número de espiras pela corrente da respectiva fase. Como as correntes podem ser representadas pelos seus fasores, escreve-se:

$$\dot{fmm}_a = K . N_a . \dot{I}_a \quad (2.1.a)$$

$$\dot{fmm}_b = K . N_b . \dot{I}_b \quad (2.1.b)$$

$$\dot{fmm}_c = K . N_c . \dot{I}_c \quad (2.1.c)$$

onde \dot{fmm}_i ($i = a, b, c$) é o fasor que representa a força magnetomotriz de cada fase e K é um fator que representa o produto do fator de enrolamento pelo fator de forma do harmônico fundamental e o número de pólos [21].

O sistema $\dot{f}mm_a$, $\dot{f}mm_b$ e $\dot{f}mm_c$ é trifásico desbalanceado, pois é gerado pelo sistema desbalanceado de correntes, e então se pode decompô-lo em componentes simétricas representadas pelas equações em (2.2.a), (2.2.b) e (2.2.c):

$$\dot{f}mm_a = \dot{f}mm_{a1} + \dot{f}mm_{a2} + \dot{f}mm_{a0} \quad (2.2.a)$$

$$\dot{f}mm_b = \dot{f}mm_{b1} + \dot{f}mm_{b2} + \dot{f}mm_{b0} \quad (2.2.b)$$

$$\dot{f}mm_c = \dot{f}mm_{c1} + \dot{f}mm_{c2} + \dot{f}mm_{c0} \quad (2.2.c)$$

Os índices 1, 2 e zero, nas equações acima, referem-se às conhecidas componentes simétricas de seqüência positiva, negativa e nula respectivamente. Como as componentes simétricas de certa seqüência formam um sistema balanceado, é possível colocá-las uma em função das outras, e desta forma o sistema de equações (2.2) se torna (2.3):

$$\begin{bmatrix} \dot{f}mm_a \\ \dot{f}mm_b \\ \dot{f}mm_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{f}mm_{a0} \\ \dot{f}mm_{a1} \\ \dot{f}mm_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

onde: $\alpha = 1 \angle 120^\circ$

As componentes simétricas das forças magnetomotrizes são produzidas por componentes não simétricas de corrente uma vez que os enrolamentos **A**, **B** e **C** têm números de espiras diferentes. Chamando de \dot{I}_{ap} , \dot{I}_{bp} e \dot{I}_{cp} as componentes não-simétricas de correntes que produzem as componentes

simétricas de seqüência positiva das forças magnetomotrizes, pode-se escrever as equações (2.4.a), (2.4.b) e (2.4.c):

$$\dot{fmm}_{a1} = K . N_a . \dot{I}_{ap} \quad (2.4.a)$$

$$\dot{fmm}_{b1} = K . N_b . \dot{I}_{bp} \quad (2.4.b)$$

$$\dot{fmm}_{c1} = K . N_c . \dot{I}_{cp} \quad (2.4.c)$$

Da mesma forma, chamando de \dot{I}_{an} , \dot{I}_{bn} e \dot{I}_{cn} as componentes não-simétricas de correntes que produzem as componentes simétricas de seqüência negativa das forças magnetomotrizes, pode-se escrever as equações (2.5.a), (2.5.b) e (2.5.c):

$$\dot{fmm}_{a2} = K . N_a . \dot{I}_{an} \quad (2.5.a)$$

$$\dot{fmm}_{b2} = K . N_b . \dot{I}_{bn} \quad (2.5.b)$$

$$\dot{fmm}_{c2} = K . N_c . \dot{I}_{cn} \quad (2.5.c)$$

Finalmente, chamando de \dot{I}_{az} , \dot{I}_{bz} e \dot{I}_{cz} as componentes de correntes que produzem as forças magnetomotrizes de seqüência zero, tem-se as equações (2.6.a), (2.6.b) e (2.6.c):

$$\dot{fmm}_{a0} = K . N_a . \dot{I}_{az} \quad (2.6.a)$$

$$\dot{fmm}_{b0} = K . N_b . \dot{I}_{bz} \quad (2.6.b)$$

$$\dot{fmm}_{c0} = K . N_c . \dot{I}_{cz} \quad (2.6.c)$$

Substituindo-se as equações (2.4.a), (2.5.a), (2.6.a) e (2.1) em (2.3), obtém-se:

$$\begin{bmatrix} N_a \dot{I}_a \\ N_b \dot{I}_b \\ N_c \dot{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} N_a \dot{I}_{az} \\ N_a \dot{I}_{ap} \\ N_a \dot{I}_{an} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Dividindo a primeira equação do sistema (2.7) por N_a , a segunda por N_b e a terceira por N_c , tem-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ b & b \alpha^2 & b \alpha \\ c & c \alpha & c \alpha^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_{az} \\ \dot{I}_{ap} \\ \dot{I}_{an} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

onde:

$$b = \frac{N_a}{N_b}$$

e

$$c = \frac{N_a}{N_c}$$

Obteve-se aqui, então, as correntes no estator da máquina em função das componentes de corrente \dot{I}_{az} , \dot{I}_{ap} e \dot{I}_{an} . Obter-se-á, agora, as relações das tensões no estator da máquina com as mesmas componentes de corrente.

A tensão em cada fase do estator se relaciona com a respectiva corrente e f.e.m. através do seguinte sistema de equações [2], mostrado em (2.9):

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{sa} & 0 & 0 \\ 0 & \dot{Z}_{sb} & 0 \\ 0 & 0 & \dot{Z}_{sc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{E}_a \\ \dot{E}_b \\ \dot{E}_c \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Na equação acima, \dot{E}_a , \dot{E}_b e \dot{E}_c são as tensões induzidas por fase no estator do motor devido aos campos girantes produzidos pelas distribuições de força magnetomotriz $f_{mm\ i}$ ($i = a, b, c$), e \dot{Z}_{sa} , \dot{Z}_{sb} e \dot{Z}_{sc} são as impedâncias que representam a resistência e a reatância de dispersão por fase do estator da máquina assimétrica nas fases **A**, **B** e **C** respectivamente, conforme equações (2.10.a), (2.10.b) e (2.10.c). Portanto:

$$\dot{Z}_{sa} = R_{sa} + jX_{sa} \quad (2.10.a)$$

$$\dot{Z}_{sb} = R_{sb} + jX_{sb} \quad (2.10.b)$$

$$\dot{Z}_{sc} = R_{sc} + jX_{sc} \quad (2.10.c)$$

sendo que X_{sa} , X_{sb} e X_{sc} representam as reatâncias de dispersão e R_{sa} , R_{sb} e R_{sc} representam as resistências das fases **A**, **B** e **C** do estator, respectivamente.

As tensões \dot{E}_a , \dot{E}_b e \dot{E}_c podem ser decompostas nas suas componentes não simétricas de seqüência positiva \dot{E}_{ap} , \dot{E}_{bp} e \dot{E}_{cp} e de seqüência negativa \dot{E}_{an} , \dot{E}_{bn} e \dot{E}_{cn} , conforme equações (2.11.a), (2.11.b) e (2.11.c). Não existem aqui as componentes de seqüência zero uma vez que as f.e.m's têm origem devido à velocidade relativa entre os campos girantes de seqüência positiva e negativa e o estator.

Desta forma pode-se escrever:

$$\dot{E}_a = \dot{E}_{ap} + \dot{E}_{an} \quad (a) \quad (2.11.a)$$

$$\dot{E}_b = \dot{E}_{bp} + \dot{E}_{bn} \quad (b) \quad (2.11.b)$$

$$\dot{E}_c = \dot{E}_{cp} + \dot{E}_{cn} \quad (c) \quad (2.11.c)$$

As tensões \dot{E}_{ap} , \dot{E}_{bp} e \dot{E}_{cp} são geradas pelo efeito do campo girante de seqüência positiva. Portanto, elas são proporcionais aos respectivos números de espiras por fase, e estão defasadas de 120° elétricos entre si. Relacionando estas tensões, conforme [2], pode-se escrever as equações (2.12.a), e (2.12.b).

$$\frac{\dot{E}_{bp}}{\dot{E}_{ap}} = \frac{N_b}{N_a} \alpha^2 \quad (2.12.a)$$

$$\frac{\dot{E}_{cp}}{\dot{E}_{ap}} = \frac{N_c}{N_a} \alpha \quad (2.12.b)$$

Da mesma forma, as tensões \dot{E}_{an} , \dot{E}_{bn} e \dot{E}_{cn} que são geradas pelo campo magnético girante de seqüência negativa, são relacionados entre si, conforme equações (2.13.a), e (2.13.b), da seguinte forma:

$$\frac{\dot{E}_{bn}}{\dot{E}_{an}} = \frac{N_b}{N_a} \alpha \quad (2.13.a)$$

$$\frac{\dot{E}_{cn}}{\dot{E}_{an}} = \frac{N_c}{N_a} \alpha^2 \quad (2.13.b)$$

As relações (2.12) e (2.13) podem também ser escritas conforme equação (2.14):

$$\dot{E}_{bp} = \frac{\alpha^2}{b} \dot{E}_{ap} \quad (2.14.a)$$

$$\dot{E}_{cp} = \frac{\alpha}{c} \dot{E}_{ap} \quad (2.14.b)$$

$$\dot{E}_{bn} = \frac{\alpha}{b} \dot{E}_{an} \quad (2.14.c)$$

$$\dot{E}_{cn} = \frac{\alpha^2}{c} \dot{E}_{an} \quad (2.14.d)$$

Substituindo-se (2.14) em (2.11), vem (2.15):

$$\dot{E}_a = \dot{E}_{ap} + \dot{E}_{an} \quad (2.15.a)$$

$$\dot{E}_b = \frac{\alpha^2}{b} \dot{E}_{ap} + \frac{\alpha}{b} \dot{E}_{an} \quad (2.15.b)$$

$$\dot{E}_c = \frac{\alpha}{c} \dot{E}_{ap} + \frac{\alpha^2}{c} \dot{E}_{an} \quad (2.15.c)$$

Tomando-se como referência a fase **A**, a tensão \dot{E}_{ap} e a corrente \dot{I}_{ap} estão relacionadas através do circuito equivalente de seqüência positiva da fase **A** da máquina assimétrica (figura 2.2), ao mesmo tempo em que \dot{E}_{an} e \dot{I}_{an} estão relacionadas através do circuito equivalente de seqüência negativa (figura 2.3). Portanto pode-se escrever as equações (2.16.a) e (2.16.b).

$$\dot{E}_{ap} = \dot{Z}_{ap}' \dot{I}_{ap} \quad (2.16.a)$$

$$\dot{E}_{an} = \dot{Z}_{an}' \dot{I}_{an} \quad (2.16.b)$$

onde \dot{Z}_{ap}' é a impedância equivalente no circuito mostrado na figura 2.2.

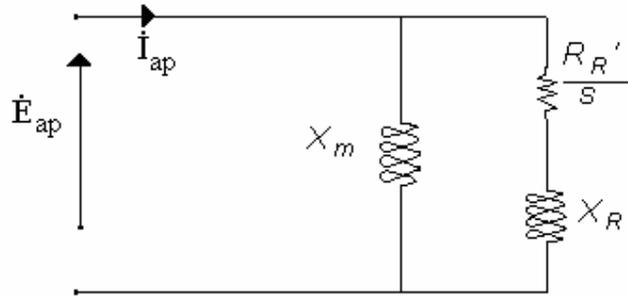


Figura 2.2 – Impedância do circuito de seqüência positiva

A impedância \dot{Z}_{an}' , por sua vez, refere-se ao circuito da figura 2.3.

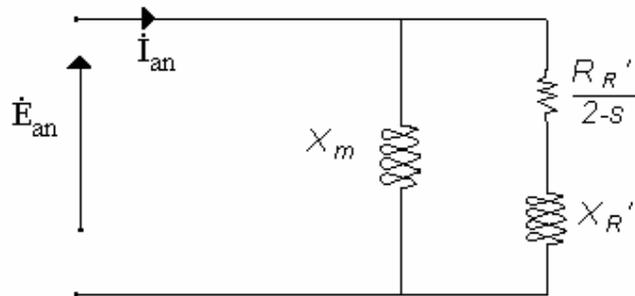


Figura 2.3 – Impedância do circuito de seqüência negativa

Nas figuras 2.2 e 2.3, tem-se para a fase A:

X_m - É a reatância de magnetização por fase da máquina.

X_R' - reatância de dispersão do rotor bloqueado por fase, referida ao estator.

R_R' - resistência por fase do rotor, referida ao estator.

s - escorregamento.

Comparando as impedâncias dos circuitos das figuras 2.2 e 2.3 com os circuitos equivalentes de seqüências positiva e negativa da máquina de indução, respectivamente figuras 2.4 e 2.5, pode-se escrever as equações (2.17.a) e (2.17.b).

$$\dot{Z}_{ap}' = \dot{Z}_{ap} - \dot{Z}_{sa} \quad (2.17.a)$$

$$\dot{Z}_{an}' = \dot{Z}_{an} - \dot{Z}_{sa} \quad (2.17.b)$$

\dot{Z}_{ap} e \dot{Z}_{an} são as impedâncias de seqüências positiva e negativa respectivamente (fase A), mostradas nas figuras 2.4 e 2.5 como as impedâncias equivalentes desses circuitos. A impedância $\dot{Z}_s = R_s + jX_s$ foi definida anteriormente na equação (2.10.a). R_s e X_s representam, respectivamente, a resistência por fase do estator e a reatância de dispersão por fase do estator.

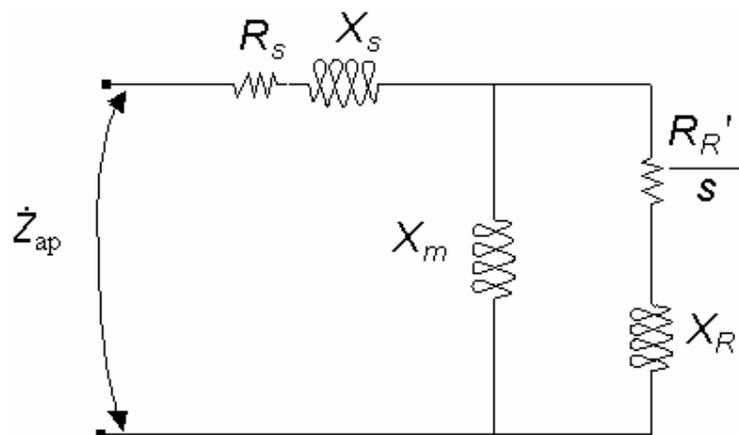


Figura 2.4 – Circuito equivalente de seqüência positiva da máquina de indução

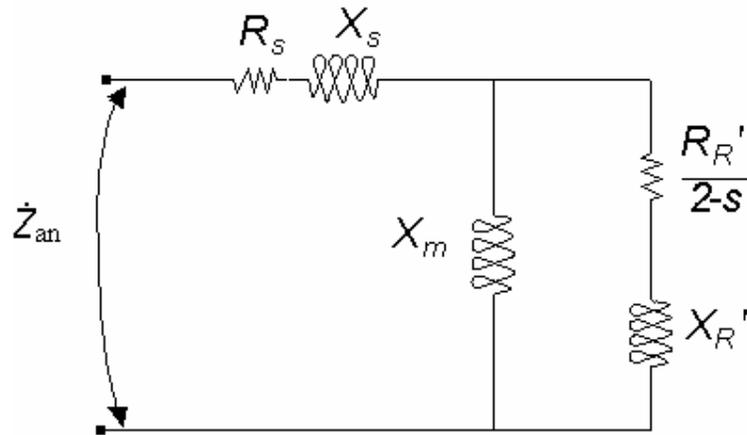


Figura 2.5 – Circuito equivalente de seqüência negativa da máquina de indução

Substituindo o sistema (2.16) em (2.15) vem:

$$\dot{E}_a = \dot{Z}_{ap}' \dot{I}_{ap} + \dot{Z}_{an}' \dot{I}_{an} \quad (2.18.a)$$

$$\dot{E}_b = \frac{\alpha^2}{b} \dot{Z}_{ap}' \dot{I}_{ap} + \frac{\alpha}{b} \dot{Z}_{an}' \dot{I}_{an} \quad (2.18.b)$$

$$\dot{E}_c = \frac{\alpha}{c} \dot{Z}_{ap}' \dot{I}_{ap} + \frac{\alpha^2}{c} \dot{Z}_{an}' \dot{I}_{an} \quad (2.18.a)$$

Colocando o sistema (2.18) na forma matricial, em função também de \dot{I}_{az} , obtém-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_a \\ \dot{E}_b \\ \dot{E}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \dot{Z}_{ap}' & \dot{Z}_{an}' \\ 0 & \frac{\alpha^2}{b} \dot{Z}_{ap}' & \frac{\alpha}{b} \dot{Z}_{an}' \\ 0 & \frac{\alpha}{c} \dot{Z}_{ap}' & \frac{\alpha^2}{c} \dot{Z}_{an}' \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_{az} \\ \dot{I}_{ap} \\ \dot{I}_{an} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Aplicando (2.8) e (2.19) em (2.9) vem:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{sa} & \dot{Z}_{sa} + \dot{Z}_{ap}' & \dot{Z}_{sa} + \dot{Z}_{an}' \\ b\dot{Z}_{sb} & \alpha^2 \left(b\dot{Z}_{sb} + \frac{\dot{Z}_{ap}'}{b} \right) & \alpha \left(b\dot{Z}_{sb} + \frac{\dot{Z}_{an}'}{b} \right) \\ c\dot{Z}_{sc} & \alpha \left(c\dot{Z}_{sc} + \frac{\dot{Z}_{ap}'}{c} \right) & \alpha^2 \left(c\dot{Z}_{sc} + \frac{\dot{Z}_{an}'}{c} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{az} \\ \dot{I}_{ap} \\ \dot{I}_{an} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Em (2.20), \dot{Z}_{sb} e \dot{Z}_{sc} serão colocados em função de \dot{Z}_{sa} a partir da observação do sistema (2.10).

Como qualquer reatância indutiva é proporcional ao quadrado do número de espiras do enrolamento, pode-se escrever:

$$X_{sa} = K \cdot N_a^2 \quad (2.21.a)$$

$$X_{sb} = K \cdot N_b^2 \quad (2.21.b)$$

$$X_{sc} = K \cdot N_c^2 \quad (2.21.c)$$

onde \mathbf{K} caracteriza o circuito magnético de dispersão do estator.

Portanto, dividindo (2.21.a) por (2.21.b) e (2.21.a) por (2.21.c) obtém-se respectivamente:

$$X_{sb} = \frac{1}{b^2} X_{sa} \quad (2.22.a)$$

$$X_{sc} = \frac{1}{c^2} X_{sa} \quad (2.22.b)$$

Para manter idênticas as relações das reatâncias de dispersão com as resistências, pode-se escolher a secção transversal do fio dos enrolamentos **A**, **B** e **C** de forma adequada. Portanto:

$$R_{sb} = \frac{1}{b^2} R_{sa} \quad (2.23.a)$$

$$R_{sc} = \frac{1}{c^2} R_{sa} \quad (2.23.b)$$

Para tanto, se **da**, **db** e **dc** são os diâmetros dos fios dos enrolamentos **A**, **B** e **C** respectivamente, tem-se:

$$db = \sqrt{b} .da \quad (2.24.a)$$

$$dc = \sqrt{c} .da \quad (2.24.b)$$

Desta forma, a partir das expressões (2.10), (2.22) e (2.23) obtém-se:

$$\dot{Z}_{sb} = \frac{1}{b^2} \dot{Z}_{sa} \quad (2.25.a)$$

$$\dot{Z}_{sc} = \frac{1}{c^2} \dot{Z}_{sa} \quad (2.25.b)$$

Substituindo-se o sistema (2.25) em (2.20) tem-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{sa} & \dot{Z}_{sa} + \dot{Z}_{ap}' & \dot{Z}_{sa} + \dot{Z}_{an}' \\ \frac{\dot{Z}_{sa}}{b} & \frac{\alpha^2}{b} (\dot{Z}_{sa} + \dot{Z}_{ap}') & \frac{\alpha}{b} (\dot{Z}_{sa} + \dot{Z}_{an}') \\ \frac{\dot{Z}_{sa}}{c} & \frac{\alpha}{c} (\dot{Z}_{sa} + \dot{Z}_{ap}') & \frac{\alpha^2}{c} (\dot{Z}_{sa} + \dot{Z}_{an}') \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_{az} \\ \dot{I}_{ap} \\ \dot{I}_{an} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

De (2.17), tira-se:

$$\dot{Z}_{ap} = \dot{Z}_{ap}' + \dot{Z}_{sa} \quad (2.27.a)$$

$$\dot{Z}_{an} = \dot{Z}_{an}' + \dot{Z}_{sa} \quad (2.27.b)$$

então a equação (2.26) torna-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{sa} & \dot{Z}_{ap} & \dot{Z}_{an} \\ \frac{\dot{Z}_{sa}}{b} & \frac{\alpha^2}{b} \dot{Z}_{ap} & \frac{\alpha}{b} \dot{Z}_{an} \\ \frac{\dot{Z}_{sa}}{c} & \frac{\alpha}{c} \dot{Z}_{ap} & \frac{\alpha^2}{c} \dot{Z}_{an} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_{az} \\ \dot{I}_{ap} \\ \dot{I}_{an} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

A expressão (2.28) mostra as relações que existem entre as tensões nos enrolamentos de estator da máquina assimétrica e as componentes de correntes definidas anteriormente. Determina-se agora as relações entre as tensões nos enrolamentos de estator e as correntes nos mesmos enrolamentos. Inicialmente, inverte-se a matriz das constantes em (2.8) obtendo-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{az} \\ \dot{I}_{ap} \\ \dot{I}_{an} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{b} & \frac{1}{c} \\ 1 & \frac{\alpha}{b} & \frac{\alpha^2}{c} \\ 1 & \frac{\alpha^2}{b} & \frac{\alpha}{c} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Substituindo (2.29) em (2.28), obtém-se (2.30) na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \dot{Z}_{11} & \frac{\dot{Z}_{12}}{b} & \frac{\dot{Z}_{13}}{c} \\ \frac{\dot{Z}_{13}}{b} & \frac{\dot{Z}_{11}}{b^2} & \frac{\dot{Z}_{12}}{bc} \\ \frac{\dot{Z}_{12}}{c} & \frac{\dot{Z}_{13}}{bc} & \frac{\dot{Z}_{11}}{c^2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

ou (2.31), na forma de equações:

$$\begin{cases} \dot{V}_a = \dot{Z}_{11} \dot{I}_a / 3 + \dot{Z}_{12} \dot{I}_b / 3b + \dot{Z}_{13} \dot{I}_c / 3c & (2.31.a) \\ \dot{V}_b = \dot{Z}_{13} \dot{I}_a / 3b + \dot{Z}_{11} \dot{I}_b / 3b^2 + \dot{Z}_{12} \dot{I}_c / 3bc & (2.31.b) \\ \dot{V}_c = \dot{Z}_{12} \dot{I}_a / 3c + \dot{Z}_{13} \dot{I}_b / 3bc + \dot{Z}_{11} \dot{I}_c / 3c^2 & (2.31.c) \end{cases}$$

onde:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{11} &= \dot{Z}_{sa} + \dot{Z}_{ap} + \dot{Z}_{an} \\ \dot{Z}_{12} &= \dot{Z}_{sa} + \alpha \cdot \dot{Z}_{ap} + \alpha^2 \cdot \dot{Z}_{an} \\ \dot{Z}_{13} &= \dot{Z}_{sa} + \alpha^2 \cdot \dot{Z}_{ap} + \alpha \cdot \dot{Z}_{an} \end{aligned}$$

2.3 – Gerador de Indução Trifásico Assimétrico alimentando uma Carga Trifásica – Fator de Desbalanceamento.

As equações obtidas no item anterior são válidas tanto para um motor de indução assimétrico quanto para um gerador de indução assimétrico, sendo diferenciado na aplicação pelo valor do escorregamento.

O gerador assimétrico é derivado do gerador simétrico convencional, alterando-se o número de espiras por fase do estator. Assim, em termos de ligação, a máquina assimétrica é ligada a um sistema monofásico de baixa potência, o qual fornece a frequência a ser estabelecida no sistema trifásico como um todo. A ligação à carga trifásica é feita normalmente. Um capacitor é conectado entre dois terminais do enrolamento do estator.

Devido à disponibilidade de tensões monofásicas (fase - neutro) de 127 volts na região rural de Mato Grosso, utiliza-se uma rede monofásica aplicada diretamente ao enrolamento da fase A do estator, compatibilizando com a tensão nominal do enrolamento.

Uma importante medida do nível de desbalanceamento entre as tensões ou entre as correntes nos enrolamentos do estator da máquina, chamada de **Fator de Desbalanceamento** [2], é apresentada aqui. Este fator é função dos valores de “b” , “c” , capacitância, carga trifásica, escorregamento e tensão da rede monofásica.

A figura 2.6 ilustra o esquema de ligação que envolve o gerador assimétrico, a máquina primária, a rede monofásica, o capacitor e a carga trifásica.

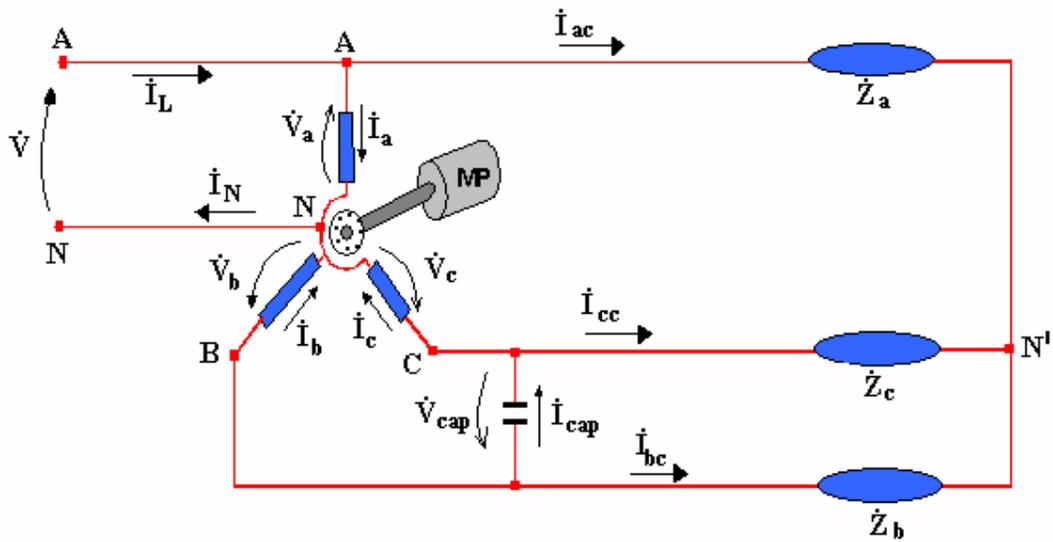


Figura 2.6 – Esquema de ligação do sistema proposto

O tratamento matemático do modelo é no domínio da frequência, recebendo as simbologias abaixo:

\dot{V} - É a tensão da rede monofásica;

$\dot{V}_a = \dot{V}_{AN} = \dot{V}_A$; $\dot{V}_b = \dot{V}_{BN} = \dot{V}_B$; $\dot{V}_c = \dot{V}_{CN} = \dot{V}_C$ - tensões nas fases A, B e C do gerador, respectivamente;

$\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$ - correntes nas fases A, B e C do gerador, respectivamente;

\dot{V}_{cap} - tensão no capacitor;

\dot{I}_{cap} - corrente no capacitor;

$\dot{I}_{ac}, \dot{I}_{bc}, \dot{I}_{cc}$ - correntes de linha nas fases A, B e C da carga, respectivamente;

$\dot{V}_{AB}, \dot{V}_{BC}, \dot{V}_{CA}$ - tensões de linha no sistema trifásico A, B e C; e

\dot{I}_L - corrente de linha, da rede monofásica.

Por sua vez, os outros símbolos representam:

$\dot{Z}_a, \dot{Z}_b, \dot{Z}_c$ - impedâncias constantes das fases A, B e C da carga, respectivamente e

M.P. - máquina primária.

2.3.1 - Desenvolvimento Matemático – Sistema de equações.

O sistema estudado envolve seis variáveis fasoriais ($\dot{V}_a, \dot{V}_b, \dot{V}_c, \dot{I}_a, \dot{I}_b$ e \dot{I}_c), sendo que a tensão de alimentação \dot{V}_a é conhecida. Assim, busca-se somente cinco equações fasoriais para o cálculo das cinco variáveis desconhecidas. A equação 2.31, que é a equação relativa à máquina assimétrica, nos fornece três destas equações fasoriais. Para se obter as outras duas equações fasoriais utiliza-se as malhas e os nós mostrados na figura 2.6.

Estudar-se-á neste item as relações entre as grandezas elétricas e mecânicas com o fator de desbalanceamento.

Da figura 2.6, pela teoria de circuitos elétricos [14-16], nos nós **N**, **N'**, **A**, **B** e **C** têm-se, respectivamente que:

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = \dot{I}_L \quad (2.32)$$

$$\dot{I}_{ac} + \dot{I}_{bc} + \dot{I}_{cc} = 0 \quad (2.33)$$

$$\dot{I}_a + \dot{I}_{ac} = \dot{I}_L \quad (2.34)$$

$$\dot{I}_b + \dot{I}_{cap} + \dot{I}_{bc} = 0 \quad (2.35)$$

$$\dot{I}_c + \dot{I}_{cc} = \dot{I}_{cap} \quad (2.36)$$

Na carga tem-se:

$$\dot{V}_A - \dot{V}_{N'} = \dot{Z}_a \dot{I}_{ac} \quad (2.37)$$

$$\dot{V}_B - \dot{V}_{N'} = \dot{Z}_b \dot{I}_{bc} \quad (2.38)$$

$$\dot{V}_C - \dot{V}_{N'} = \dot{Z}_c \dot{I}_{cc} \quad (2.39)$$

Ainda da figura 2.6, tem-se que:

$$\dot{V}_B - \dot{V}_C = \dot{V}_{cap} = \dot{Z}_{cap} \dot{I}_{cap} \quad (2.40)$$

Igualando (2.32) com (2.34), bem como substituindo (2.36) em (2.35) obtém-se, respectivamente:

$$\dot{I}_b + \dot{I}_c = \dot{I}_{ac} \quad (2.41)$$

$$\dot{I}_{cc} + \dot{I}_{bc} + \dot{I}_c + \dot{I}_b = 0 \quad (2.42)$$

Subtraindo (2.37) de (2.38); (2.38) de (2.39) e (2.37) de (2.39) obtém-se, respectivamente:

$$\dot{V}_A - \dot{V}_B = \dot{Z}_a \dot{I}_{ac} - \dot{Z}_b \dot{I}_{bc} \quad (2.43)$$

$$\dot{V}_B - \dot{V}_C = \dot{Z}_b \dot{I}_{bc} - \dot{Z}_c \dot{I}_{cc} \quad (2.44)$$

$$\dot{V}_A - \dot{V}_C = \dot{Z}_a \dot{I}_{ac} - \dot{Z}_c \dot{I}_{cc} \quad (2.45)$$

Substituindo (2.41) em (2.45), obtém-se:

$$\dot{I}_{cc} = \frac{\dot{V}_C - \dot{V}_A + \dot{Z}_a (\dot{I}_b + \dot{I}_c)}{\dot{Z}_c} \quad (2.46)$$

Substituindo (2.46) em (2.42), tem-se que:

$$\dot{I}_{bc} = \frac{\dot{V}_A - \dot{V}_C - (\dot{Z}_a + \dot{Z}_c)(\dot{I}_b + \dot{I}_c)}{\dot{Z}_c} \quad (2.47)$$

Substituindo (2.36) em (2.40) obtém-se:

$$\dot{V}_B - \dot{V}_C = \dot{Z}_{cap} (\dot{I}_c + \dot{I}_{cc}) \quad (2.48)$$

Agora, substituindo (2.46) em (2.48) obtém-se uma das duas equações que integrará o Sistema de Equações:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{cap} \dot{V}_A + \dot{Z}_c \dot{V}_B - (\dot{Z}_c + \dot{Z}_{cap}) \dot{V}_C &= \dot{Z}_{cap} (\dot{Z}_c + \dot{Z}_a) \dot{I}_c + \\ + \dot{Z}_{cap} \dot{Z}_a \dot{I}_b \end{aligned} \quad (2.49)$$

Para se obter a outra equação, substitui-se (2.41) e (2.47) em (2.43):

$$(\dot{Z}_c + \dot{Z}_b) \dot{V}_A - \dot{Z}_c \dot{V}_B - \dot{Z}_b \dot{V}_C = (\dot{Z}_a \dot{Z}_b + \dot{Z}_b \dot{Z}_c + \dot{Z}_a \dot{Z}_c) (\dot{I}_c + \dot{I}_b) \quad (2.50)$$

Portanto, o sistema de equações será formado pelas equações em (2.31) e pelas equações (2.49) e (2.50), obtendo-se:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{V}_A &= \dot{Z}_{11} \dot{I}_a / 3 + \dot{Z}_{12} \dot{I}_b / 3b + \dot{Z}_{13} \dot{I}_c / 3c & (2.51.a) \\ \dot{V}_B &= \dot{Z}_{13} \dot{I}_a / 3b + \dot{Z}_{11} \dot{I}_b / 3b^2 + \dot{Z}_{12} \dot{I}_c / 3bc & (2.51.b) \\ \dot{V}_C &= \dot{Z}_{12} \dot{I}_a / 3c + \dot{Z}_{13} \dot{I}_b / 3bc + \dot{Z}_{11} \dot{I}_c / 3c^2 & (2.51.c) \\ \dot{Z}_{cap} \dot{V}_A + \dot{Z}_c \dot{V}_B - (\dot{Z}_c + \dot{Z}_{cap}) \dot{V}_C &= \dot{Z}_{cap} (\dot{Z}_c + \dot{Z}_a) \dot{I}_c + \\ + \dot{Z}_{cap} \dot{Z}_a \dot{I}_b & & (2.51.d) \\ (\dot{Z}_c + \dot{Z}_b) \dot{V}_A - \dot{Z}_c \dot{V}_B - \dot{Z}_b \dot{V}_C &= (\dot{Z}_a \dot{Z}_b + \dot{Z}_b \dot{Z}_c + \dot{Z}_a \dot{Z}_c) (\dot{I}_c + \dot{I}_b) & (2.51.e) \end{aligned} \right.$$

As variáveis, no sistema de equações acima, podem ser calculadas pelos processos matemáticos convencionais; por exemplo, utilizando matrizes.

2.3.2 – Fator de desbalanceamento.

Calcular-se-á, aqui, dois fatores de desbalanceamento; um de corrente (F_i) e outro de tensão (F_v). O fator de desbalanceamento de corrente será importante nas deduções das fórmulas das grandezas elétricas envolvidas no processo, enquanto o fator de desbalanceamento de tensão será importante como medida do nível de desbalanceamento das tensões que o gerador assimétrico irá fornecer à carga trifásica.

❖ Fator de desbalanceamento de corrente

Conforme definido em [2], o fator de desbalanceamento de corrente é a relação entre I_{an} e I_{ap} . Para encontrar esta relação manipula-se matematicamente as equações do sistema de equações (2.51).

Substituindo (2.51.a), (b) e (c) em (d) obtém-se:

$$\begin{aligned} & (\dot{Z}_{cap}/3)(\dot{Z}_{11}\dot{I}_a + \dot{Z}_{12}\dot{I}_b/b + \dot{Z}_{13}\dot{I}_c/c) + (\dot{Z}_c/3)(\dot{Z}_{13}\dot{I}_a/b + \dot{Z}_{11}\dot{I}_b/b^2 + \dot{Z}_{12}\dot{I}_c/bc) - \\ & - [(\dot{Z}_c + \dot{Z}_{cap})/3](\dot{Z}_{12}\dot{I}_a/c + \dot{Z}_{13}\dot{I}_b/bc + \dot{Z}_{11}\dot{I}_c/c^2) = \dot{Z}_{cap}(\dot{Z}_c + \dot{Z}_a)\dot{I}_c + \dot{Z}_{cap}\dot{Z}_a\dot{I}_b \end{aligned} \quad (2.52)$$

Realizando as operações indicadas em (2.52), obtém-se:

$$\dot{Z}_A\dot{I}_a + \dot{Z}_B\dot{I}_b + \dot{Z}_C\dot{I}_c = 0 \quad (2.53)$$

onde:

$$\begin{aligned}\dot{Z}_A &= \dot{Z}_{cap}\dot{Z}_{11}/3 + \dot{Z}_c\dot{Z}_{13}/3b - \dot{Z}_{12}(\dot{Z}_c + \dot{Z}_{cap})/3c \\ \dot{Z}_B &= \dot{Z}_{cap}\dot{Z}_{12}/3b + \dot{Z}_c\dot{Z}_{11}/3b^2 - \dot{Z}_{13}(\dot{Z}_c + \dot{Z}_{cap})/3bc - \dot{Z}_{cap}\dot{Z}_a \\ \dot{Z}_C &= \dot{Z}_{cap}\dot{Z}_{13}/3c + \dot{Z}_c\dot{Z}_{12}/3bc - \dot{Z}_{11}(\dot{Z}_c + \dot{Z}_{cap})/3c^2 - \dot{Z}_{cap}(\dot{Z}_c + \dot{Z}_a)\end{aligned}$$

Na equação (2.53), substituindo as variáveis \dot{I}_a , \dot{I}_b e \dot{I}_c pelas suas componentes \dot{I}_{az} , \dot{I}_{ap} e \dot{I}_{an} , de acordo com (2.8), tem-se:

$$\dot{Z}_0\dot{I}_{az} + \dot{Z}_1\dot{I}_{ap} + \dot{Z}_2\dot{I}_{an} = 0 \quad (2.54)$$

onde:

$$\begin{aligned}\dot{Z}_0 &= \dot{Z}_A + b\dot{Z}_B + c\dot{Z}_C \\ \dot{Z}_1 &= \dot{Z}_A + b\alpha^2\dot{Z}_B + c\alpha\dot{Z}_C \\ \dot{Z}_2 &= \dot{Z}_A + b\alpha\dot{Z}_B + c\alpha^2\dot{Z}_C\end{aligned}$$

Isolando \dot{I}_{az} em (2.54), obtém-se:

$$\dot{I}_{az} = -\dot{\lambda}_1\dot{I}_{ap} - \dot{\lambda}_2\dot{I}_{an} \quad (2.55)$$

onde:

$$\begin{aligned}\dot{\lambda}_1 &= \dot{Z}_1 / \dot{Z}_0 \\ \dot{\lambda}_2 &= \dot{Z}_2 / \dot{Z}_0\end{aligned}$$

Por outro lado, em (2.51), substituindo (a), (b) e (c) em (e) obtém-se:

$$[(\dot{Z}_c + \dot{Z}_b)/3](\dot{Z}_{11}\dot{I}_a + \dot{Z}_{12}\dot{I}_b/b + \dot{Z}_{13}\dot{I}_c/c) - (\dot{Z}_c/3)(\dot{Z}_{13}\dot{I}_a/b + \dot{Z}_{11}\dot{I}_b/b^2 + \dot{Z}_{12}\dot{I}_c/bc) - (\dot{Z}_b/3)(\dot{Z}_{12}\dot{I}_a/c + \dot{Z}_{13}\dot{I}_b/bc + \dot{Z}_{11}\dot{I}_c/c^2) = (\dot{Z}_a\dot{Z}_b + \dot{Z}_b\dot{Z}_c + \dot{Z}_a\dot{Z}_c)(\dot{I}_b + \dot{I}_c) \quad (2.56)$$

Realizando as operações indicadas em (2.56), obtém-se:

$$\dot{Z}_A' \dot{I}_a + \dot{Z}_B' \dot{I}_b + \dot{Z}_C' \dot{I}_c = 0 \quad (2.57)$$

onde:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_A' &= \dot{Z}_{11}(\dot{Z}_c + \dot{Z}_b)/3 - \dot{Z}_c\dot{Z}_{13}/3b - \dot{Z}_b\dot{Z}_{12}/3c \\ \dot{Z}_B' &= \dot{Z}_{12}(\dot{Z}_c + \dot{Z}_b)/3b - \dot{Z}_c\dot{Z}_{11}/3b^2 - \dot{Z}_b\dot{Z}_{13}/3bc - (\dot{Z}_a\dot{Z}_b + \dot{Z}_b\dot{Z}_c + \dot{Z}_a\dot{Z}_c) \\ \dot{Z}_C' &= \dot{Z}_{13}(\dot{Z}_c + \dot{Z}_b)/3c - \dot{Z}_c\dot{Z}_{12}/3bc - \dot{Z}_b\dot{Z}_{11}/3c^2 - (\dot{Z}_a\dot{Z}_b + \dot{Z}_b\dot{Z}_c + \dot{Z}_a\dot{Z}_c) \end{aligned}$$

Na equação (2.57), substituindo as variáveis \dot{I}_a , \dot{I}_b e \dot{I}_c pelas suas componentes \dot{I}_{az} , \dot{I}_{ap} e \dot{I}_{an} , de acordo com (2.8), tem-se:

$$\dot{Z}_0' \dot{I}_{az} + \dot{Z}_1' \dot{I}_{ap} + \dot{Z}_2' \dot{I}_{an} = 0 \quad (2.58)$$

onde:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_0' &= \dot{Z}_A' + b\dot{Z}_B' + c\dot{Z}_C' \\ \dot{Z}_1' &= \dot{Z}_A' + b\alpha^2\dot{Z}_B' + c\alpha\dot{Z}_C' \\ \dot{Z}_2' &= \dot{Z}_A' + b\alpha\dot{Z}_B' + c\alpha^2\dot{Z}_C' \end{aligned}$$

Isolando \dot{I}_{az} em (2.58), obtém-se:

$$\dot{I}_{az} = -\dot{\lambda}_1' \dot{I}_{ap} - \dot{\lambda}_2' \dot{I}_{an} \quad (2.59)$$

onde:

$$\dot{\lambda}_{1'} = \dot{Z}_{1'} / \dot{Z}_{0'}$$

$$\dot{\lambda}_{2'} = \dot{Z}_{2'} / \dot{Z}_{0'}$$

Comparando (2.55) com (2.59), resulta em:

$$-\dot{\lambda}_{1}\dot{I}_{ap} - \dot{\lambda}_{2}\dot{I}_{an} = -\dot{\lambda}_{1'}\dot{I}_{ap} - \dot{\lambda}_{2'}\dot{I}_{an} \quad (2.60)$$

Da definição de fator de desbalanceamento de corrente e de (2.60) vem:

$$\dot{F}_i = \frac{\dot{I}_{an}}{\dot{I}_{ap}} = \frac{\dot{\lambda}_{1'} - \dot{\lambda}_{1}}{\dot{\lambda}_{2} - \dot{\lambda}_{2'}} \quad (2.61)$$

Como o fator de desbalanceamento F_i é o módulo de \dot{F}_i , encontra-se:

$$F_i = \left| \dot{F}_i \right| = \left| \frac{\dot{\lambda}_{1'} - \dot{\lambda}_{1}}{\dot{\lambda}_{2} - \dot{\lambda}_{2'}} \right| \quad (2.62)$$

❖ Fator de desbalanceamento de tensão

O fator de desbalanceamento de tensão é um importante indicador do nível de desbalanceamento das tensões trifásicas do gerador de indução assimétrico que alimentam a carga trifásica.

Para o cálculo do fator de desbalanceamento de tensão (F_v) decompõe-se o sistema trifásico desbalanceado das tensões nos enrolamentos de estator da máquina assimétrica (\dot{V}_A , \dot{V}_B e \dot{V}_C) nas suas componentes simétricas de

seqüências positiva $(\dot{V}_{A1}, \dot{V}_{B1}, \dot{V}_{C1})$, negativa $(\dot{V}_{A2}, \dot{V}_{B2}, \dot{V}_{C2})$ e nula $(\dot{V}_{A0}, \dot{V}_{B0}, \dot{V}_{C0})$.

Pela teoria de componentes simétricas e conforme desenvolvimento apresentado em [2], tem-se que:

$$\begin{aligned}\dot{V}_{A0} &= (\dot{V}_A + \dot{V}_B + \dot{V}_C) / 3 \\ \dot{V}_{A1} &= (\dot{V}_A + \alpha \dot{V}_B + \alpha^2 \dot{V}_C) / 3 \\ \dot{V}_{A2} &= (\dot{V}_A + \alpha^2 \dot{V}_B + \alpha \dot{V}_C) / 3\end{aligned}\tag{2.63}$$

O fator de desbalanceamento de tensão foi definido em [2] como sendo o módulo da relação entre as componentes simétricas de seqüência negativa e positiva; sendo que neste desenvolvimento foi referido à fase A.

$$F_v = |\dot{F}_v| = \left| \frac{\dot{V}_{A2}}{\dot{V}_{A1}} \right|\tag{2.64}$$

2.3.3 – Cálculo das tensões, das correntes e das potências no gerador.

Inicialmente, calcula-se as componentes de corrente \dot{I}_{az} , \dot{I}_{ap} e \dot{I}_{an} . Da equação (2.28) tem-se que:

$$\dot{V} = \dot{V}_A = \dot{Z}_{sa} \dot{I}_{az} + \dot{Z}_{ap} \dot{I}_{ap} + \dot{Z}_{an} \dot{I}_{an}\tag{2.65.a}$$

Substituindo \dot{I}_{az} , da equação (2.55), na equação (2.65.a) obtém-se:

$$\dot{V} = \dot{V}_A = \dot{Z}_{sa} (-\dot{\lambda}_1 \dot{I}_{ap} - \dot{\lambda}_2 \dot{I}_{an}) + \dot{Z}_{ap} \dot{I}_{ap} + \dot{Z}_{an} \dot{I}_{an}\tag{2.65.b}$$

E posteriormente:

$$\dot{V} = \dot{V}_A = (\dot{Z}_{ap} - \dot{Z}_{sa} \dot{\lambda}_1) \dot{I}_{ap} + (\dot{Z}_{an} - \dot{Z}_{sa} \dot{\lambda}_2) \dot{I}_{an} \quad (2.66)$$

Substituindo $\dot{I}_{an} = \dot{I}_{ap} \dot{F}_i$ de (2.61) na equação (2.66); chega-se em:

$$\dot{V} = \dot{V}_A = [(\dot{Z}_{ap} - \dot{Z}_{sa} \dot{\lambda}_1 + \dot{F}_i(\dot{Z}_{an} - \dot{Z}_{sa} \dot{\lambda}_2))] \dot{I}_{ap} \quad (2.67)$$

Agora, conclui-se que:

$$\dot{I}_{ap} = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}} \quad (2.68)$$

onde:

$$\dot{Z} = \dot{Z}_{ap} - \dot{Z}_{sa} \dot{\lambda}_1 + \dot{F}_i(\dot{Z}_{an} - \dot{Z}_{sa} \dot{\lambda}_2)$$

Substituindo (2.68) em $\dot{I}_{an} = \dot{I}_{ap} \dot{F}_i$, obtém-se:

$$\dot{I}_{an} = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}} \dot{F}_i \quad (2.69)$$

Para o cálculo de \dot{I}_{az} combina-se (2.55) com (2.68) e com (2.69), tal que:

$$\dot{I}_{az} = \frac{-(\dot{\lambda}_1 + \dot{\lambda}_2 \dot{F}_i) \dot{V}}{\dot{Z}} \quad (2.70)$$

Agora, substituindo as equações (2.68), (2.69) e (2.70) na equação (2.8) tira-se as correntes \dot{I}_a , \dot{I}_b e \dot{I}_c do gerador, de maneira que:

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}} [1 - \dot{\lambda}_1 + \dot{F}_i(1 - \dot{\lambda}_2)] \quad (2.71.a)$$

$$\dot{I}_b = \frac{b\dot{V}}{\dot{Z}} [\alpha^2 - \dot{\lambda}_1 + \dot{F}_i(\alpha - \dot{\lambda}_2)] \quad (2.71.b)$$

$$\dot{I}_c = \frac{c\dot{V}}{\dot{Z}} [\alpha - \dot{\lambda}_1 + \dot{F}_i(\alpha^2 - \dot{\lambda}_2)] \quad (2.71.c)$$

As tensões sobre os enrolamentos “A”, “B” e “C” do estator do gerador assimétrico, \dot{V}_a , \dot{V}_b e \dot{V}_c respectivamente, são calculadas a partir da equação (2.28). Neste estudo $\dot{V}_a = \dot{V}_A = \dot{V}$ é a tensão da rede monofásica.

Substituindo (2.68), (2.69) e (2.70) em (2.28), obtém-se:

$$\dot{V}_b = \dot{V}_B = \frac{\dot{V}}{b\dot{Z}} [-\dot{Z}_{sa}(\dot{\lambda}_1 + \dot{\lambda}_2\dot{F}_i) + \alpha^2\dot{Z}_{ap} + \alpha\dot{Z}_{an}\dot{F}_i] \quad (2.72.a)$$

$$\dot{V}_c = \dot{V}_C = \frac{\dot{V}}{c\dot{Z}} [-\dot{Z}_{sa}(\dot{\lambda}_1 + \dot{\lambda}_2\dot{F}_i) + \alpha\dot{Z}_{ap} + \alpha^2\dot{Z}_{an}\dot{F}_i] \quad (2.72.b)$$

As tensões de linha, tensões que irão alimentar a carga trifásica, são obtidas da equação (2.72) e de $\dot{V}_a = \dot{V}$. Como $\dot{V}_{ab} = \dot{V}_{AB} = \dot{V}_a - \dot{V}_b$, $\dot{V}_{bc} = \dot{V}_{BC} = \dot{V}_b - \dot{V}_c$ e $\dot{V}_{ca} = \dot{V}_{CA} = \dot{V}_c - \dot{V}_a$; obtém-se respectivamente:

$$\dot{V}_{ab} = \frac{\dot{V}}{b\dot{Z}} \{ b\dot{Z} - [-\dot{Z}_{sa}(\dot{\lambda}_1 + \dot{\lambda}_2\dot{F}_i) + \alpha^2\dot{Z}_{ap} + \alpha\dot{Z}_{an}\dot{F}_i] \} \quad (2.73.a)$$

$$\dot{V}_{bc} = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}} [-\dot{Z}_{sa}(\dot{\lambda}_1 + \dot{\lambda}_2\dot{F}_i)\left(\frac{1}{b} - \frac{1}{c}\right) + \dot{Z}_{ap}\left(\frac{\alpha^2}{b} - \frac{\alpha}{c}\right) + \dot{Z}_{an}\dot{F}_i\left(\frac{\alpha}{b} - \frac{\alpha^2}{c}\right)] \quad (2.73.b)$$

$$\dot{V}_{ca} = \frac{\dot{V}}{c\dot{Z}} \{ [-\dot{Z}_{sa}(\dot{\lambda}_1 + \dot{\lambda}_2\dot{F}_i) + \alpha\dot{Z}_{ap} + \alpha^2\dot{Z}_{an}\dot{F}_i] - c\dot{Z} \} \quad (2.73.c)$$

Como se deseja fornecer tensões de linha balanceadas à carga trifásica, a regulagem para se obter um baixo nível de desbalanceamento é dada pela variação dos valores de **b**, **c** e **Cap**.

O gerador assimétrico fornece potência ativa à carga trifásica e em algumas situações à rede monofásica também. A potência ativa resultante fornecida pelo gerador (P_G), é dada por:

$$P_G = P_{GA} + P_{GB} + P_{GC} \quad (2.74)$$

onde P_{GA} , P_{GB} e P_{GC} são as potências ativas fornecidas respectivamente pelas fases **A**, **B** e **C** do gerador assimétrico. $P_{GA} = V_a I_a \cos \phi_a$, onde V_a é o módulo de \dot{V}_a , I_a é o módulo de \dot{I}_a e ϕ_a é a defasagem entre a tensão e a corrente no enrolamento **A**. P_{GB} e P_{GC} são calculados de forma similar à P_{GA} . Portanto, a equação (2.74) resulta em:

$$P_G = V_a I_a \cos \phi_a + V_b I_b \cos \phi_b + V_c I_c \cos \phi_c \quad (2.75)$$

Da mesma forma, a potência reativa absorvida pelo gerador (Q_G), é dada por:

$$Q_G = Q_{GA} + Q_{GB} + Q_{GC} \quad (2.76)$$

onde Q_{GA} , Q_{GB} e Q_{GC} são as potências reativas absorvidas respectivamente pelas fases **A**, **B** e **C** do gerador assimétrico. $Q_{GA} = V_a I_a \sin \phi_a$. A tensão V_a é a tensão da alimentação monofásica V . Q_{GB} e Q_{GC} são calculados de forma similar à Q_{GA} . Portanto, a equação (2.76) resulta em:

$$Q_G = V_a I_a \text{ sen } \phi_a + V_b I_b \text{ sen } \phi_b + V_c I_c \text{ sen } \phi_c \quad (2.77)$$

A potência reativa que é absorvida pelo gerador é fornecida pela rede monofásica e pelo capacitor.

2.3.4 – Cálculo da tensão, da corrente e da potência no capacitor.

A tensão \dot{V}_{cap} do capacitor é a própria tensão \dot{V}_{bc} , já calculada em (2.73.b). Portanto, tem-se que:

$$\dot{V}_{cap} = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}} \left[-\dot{Z}_{sa}(\dot{\lambda}_1 + \dot{\lambda}_2 \dot{F}_i) \left(\frac{1}{b} - \frac{1}{c} \right) + \dot{Z}_{ap} \left(\frac{\alpha^2}{b} - \frac{\alpha}{c} \right) + \dot{Z}_{an} \dot{F}_i \left(\frac{\alpha}{b} - \frac{\alpha^2}{c} \right) \right] \quad (2.78)$$

A corrente que circula pelo capacitor é dada pela equação (2.40), onde $\dot{I}_{cap} = \dot{V}_{cap} / \dot{Z}_{cap}$. Daí, dividindo a equação (2.78) por \dot{Z}_{cap} tem-se:

$$\dot{I}_{cap} = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}_{cap} \dot{Z}} \left[-\dot{Z}_{sa}(\dot{\lambda}_1 + \dot{\lambda}_2 \dot{F}_i) \left(\frac{1}{b} - \frac{1}{c} \right) + \dot{Z}_{ap} \left(\frac{\alpha^2}{b} - \frac{\alpha}{c} \right) + \dot{Z}_{an} \dot{F}_i \left(\frac{\alpha}{b} - \frac{\alpha^2}{c} \right) \right] \quad (2.79)$$

A potência reativa fornecida pelo capacitor (Q_{cap}) tem por objetivo suprir os reativos necessários à excitação do gerador de indução, podendo também melhorar o fator de potência do sistema. Sendo assim, Q_{cap} é dado por:

$$Q_{cap} = V_{cap} I_{cap} \text{ sen } \phi_{cap} \quad (2.80)$$

onde $\phi_{cap} = -90^\circ$ é a defasagem entre a tensão e a corrente no capacitor.

2.3.5 – Cálculo da corrente, da potência e do fator de potência no sistema monofásico de alimentação.

Substituindo (a), (b) e (c) da equação (2.71) na equação (2.32), encontra-se a corrente na alimentação monofásica - \dot{I}_L ; isto é:

$$\dot{I}_L = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}} [1 + b\alpha^2 + c\alpha + \dot{F}_i(1 + b\alpha + c\alpha^2) - (1 + b + c)(\dot{\lambda}_1 + \dot{F}_i\dot{\lambda}_2)] \quad (2.81)$$

A potência ativa no sistema monofásico (P_A) é dada por (2.82), onde V é o módulo de \dot{V} - tensão de alimentação da rede monofásica, I_L é o módulo de \dot{I}_L e ϕ é a defasagem entre a tensão e a corrente no sistema monofásico. Como a tensão de alimentação \dot{V} é a referência, o fator de potência do sistema monofásico será dado pela equação (2.83), onde $\text{Re}(\dot{I}_L)$ representa a parte real de \dot{I}_L .

$$P_A = VI_L \cos \phi \quad (2.82)$$

$$\cos \phi = \frac{\text{Re}(\dot{I}_L)}{I_L} \quad (2.83)$$

Portanto, substituindo (2.81) em (2.83), tem-se:

$$\cos \phi = \frac{\text{Re} \left\{ \frac{\dot{V}}{\dot{Z}} [1 + b\alpha^2 + c\alpha + \dot{F}_i(1 + b\alpha + c\alpha^2) - (1 + b + c)(\dot{\lambda}_1 + \dot{F}_i\dot{\lambda}_2)] \right\}}{\left| \frac{\dot{V}}{\dot{Z}} [1 + b\alpha^2 + c\alpha + \dot{F}_i(1 + b\alpha + c\alpha^2) - (1 + b + c)(\dot{\lambda}_1 + \dot{F}_i\dot{\lambda}_2)] \right|} \quad (2.84)$$

Agora, substituindo (2.84) em (2.82) tem-se a potência ativa no sistema monofásico em função de \mathbf{b} , \mathbf{c} , Cap e do fator de desbalanceamento, para uma dada tensão de alimentação monofásica, escorregamento do gerador e impedâncias da carga trifásica:

$$P_A = V \cdot \text{Re} \left\{ \frac{\dot{V}}{\dot{Z}} [1 + b\alpha^2 + c\alpha + \dot{F}_i(1 + b\alpha + c\alpha^2) - (1 + b + c)(\dot{\lambda}_1 + \dot{F}_i\dot{\lambda}_2)] \right\} \quad (2.85)$$

Da mesma forma, a potência reativa (Q_A) fornecida pela rede ao sistema será dada por (2.86), sendo que $\text{sen } \phi$ será dado pela equação (2.87). Aqui $\text{Im}(\dot{I}_L)$ representa a parte imaginária de \dot{I}_L .

$$Q_A = VI_L \text{sen } \phi \quad (2.86)$$

$$\text{sen } \phi = \frac{\text{Im}(\dot{I}_L)}{I_L} \quad (2.87)$$

Assim, pode-se reescrever a equação (2.86), obtendo-se:

$$Q_A = V \cdot \text{Im} \left\{ \frac{\dot{V}}{\dot{Z}} [1 + b\alpha^2 + c\alpha + \dot{F}_i(1 + b\alpha + c\alpha^2) - (1 + b + c)(\dot{\lambda}_1 + \dot{F}_i\dot{\lambda}_2)] \right\} \quad (2.88)$$

A potência aparente (\dot{S}), na alimentação monofásica pode ser escrita:

$$\dot{S} = P_A + jQ_A \quad (2.89)$$

Substituindo (2.85) e (2.88) em (2.89), obtém-se:

$$\dot{S} = V [\text{Re}(I_L) + j \text{Im}(I_L)] = V \dot{I}_L \quad (2.90)$$

Agora, reescrevendo (2.90), tem-se:

$$\dot{S} = \frac{V^2}{\dot{Z}} [1 + b\alpha^2 + c\alpha + \dot{F}_i(1 + b\alpha + c\alpha^2) - (1 + b + c)(\dot{\lambda}_1 + \dot{F}_i\dot{\lambda}_2)] \quad (2.91)$$

2.3.6 – Cálculo das tensões, correntes e potências na carga trifásica de impedância constante e Cargas de acoplamento.

As impedâncias da carga trifásica (\dot{Z}_a , \dot{Z}_b e \dot{Z}_c), que foram utilizadas para o desenvolvimento das fórmulas obtidas a partir do item 2.3, representam impedâncias de uma carga trifásica ligada em “Y”, equilibrada ou não. Em paralelo com a carga trifásica pode-se colocar cargas monofásicas e/ou bifásicas, que receberão a denominação de *cargas de acoplamento*. Estas cargas, monofásicas e/ou bifásicas, são cargas resistivas, e entram no sistema também com o objetivo de diminuir o fator de desbalanceamento; quando o gerador não estiver trabalhando no seu limite de geração existindo, assim, sobra de potência.

As impedâncias da carga trifásica em questão são impedâncias fixas, constantes [17].

No estudo de cargas dinâmicas [17], um motor de indução trifásico, por exemplo, a impedância em cada fase dependeria do valor do escorregamento do motor e do nível de desbalanceamento das tensões aplicadas ao motor; conforme pode ser observado através da equação da máquina de indução assimétrica, equação (2.31), alimentada por um sistema desbalanceado, fazendo $\mathbf{b} = \mathbf{c} = 1$.

A corrente \dot{I}_{ac} , que circula na impedância \dot{Z}_a , será calculada através da equação (2.34) usando a expressão de \dot{I}_a obtida em (2.71.a) e a de \dot{I}_L obtida em (2.81). Portanto, tem-se para \dot{I}_{ac} :

$$\dot{I}_{ac} = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}} [b\alpha^2 + c\alpha + \dot{F}_i(b\alpha + c\alpha^2) - (b+c)(\dot{\lambda}_1 + \dot{F}_i\dot{\lambda}_2)] \quad (2.92)$$

Da mesma forma, a corrente \dot{I}_{bc} circula na impedância \dot{Z}_b e será calculada através da equação (2.35), usando a expressão de \dot{I}_b obtida em (2.71.b) e a de \dot{I}_{cap} obtida em (2.79). Portanto, tem-se para \dot{I}_{bc} :

$$\begin{aligned} \dot{I}_{bc} = & -\frac{\dot{V}}{\dot{Z}} \left\{ \frac{1}{\dot{Z}_{cap}} [-\dot{Z}_{sa}(\dot{\lambda}_1 + \dot{\lambda}_2\dot{F}_i)\left(\frac{1}{b} - \frac{1}{c}\right) + \dot{Z}_{ap}\left(\frac{\alpha^2}{b} - \frac{\alpha}{c}\right) + \dot{Z}_{an}\dot{F}_i\left(\frac{\alpha}{b} - \frac{\alpha^2}{c}\right)] + \right. \\ & \left. + b[\alpha^2 - \dot{\lambda}_1 + \dot{F}_i(\alpha - \dot{\lambda}_2)] \right\} \end{aligned} \quad (2.93)$$

Por sua vez, a corrente \dot{I}_{cc} circula na impedância \dot{Z}_c e será calculada através da equação (2.36), usando a expressão de \dot{I}_c obtida em (2.71.c) e a de \dot{I}_{cap} obtida em (2.79). Portanto, tem-se para \dot{I}_{cc} :

$$\begin{aligned} \dot{I}_{cc} = & \frac{\dot{V}}{\dot{Z}} \left\{ \frac{1}{\dot{Z}_{cap}} [-\dot{Z}_{sa}(\dot{\lambda}_1 + \dot{\lambda}_2\dot{F}_i)\left(\frac{1}{b} - \frac{1}{c}\right) + \dot{Z}_{ap}\left(\frac{\alpha^2}{b} - \frac{\alpha}{c}\right) + \dot{Z}_{an}\dot{F}_i\left(\frac{\alpha}{b} - \frac{\alpha^2}{c}\right)] - \right. \\ & \left. - c[\alpha - \dot{\lambda}_1 + \dot{F}_i(\alpha^2 - \dot{\lambda}_2)] \right\} \end{aligned} \quad (2.94)$$

As tensões de linha que alimentam a carga trifásica \dot{V}_{ab} , \dot{V}_{bc} e \dot{V}_{ca} , já foram calculadas e estão representadas na equação (2.73).

As tensões de fase $\dot{V}_{AN'}$, $\dot{V}_{BN'}$ e $\dot{V}_{CN'}$, relativas respectivamente às fases **A**, **B** e **C** da carga na configuração “**Y**”, serão deduzidas através das respectivas equações (2.37), (2.38) e (2.39). Substituindo (2.92) em (2.37), obtém-se para a fase **A** da carga:

$$\dot{V}_{AN'} = \dot{Z}_a \dot{I}_{ac} = \frac{\dot{Z}_a \dot{V}}{\dot{Z}} [b\alpha^2 + c\alpha + \dot{F}_i(b\alpha + c\alpha^2) - (b+c)(\dot{\lambda}_1 + \dot{F}_i\dot{\lambda}_2)] \quad (2.95)$$

Da mesma forma, substituindo (2.93) em (2.38) tem-se para a fase **B** da carga:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{BN'} = \dot{Z}_B \dot{I}_{bc} = & -\frac{\dot{Z}_B \dot{V}}{\dot{Z}} \left\{ \frac{1}{\dot{Z}_{cap}} [-\dot{Z}_{sa}(\dot{\lambda}_1 + \dot{\lambda}_2 \dot{F}_i) \left(\frac{1}{b} - \frac{1}{c}\right) + \dot{Z}_{ap} \left(\frac{\alpha^2}{b} - \frac{\alpha}{c}\right) + \right. \\ & \left. + \dot{Z}_{an} \dot{F}_i \left(\frac{\alpha}{b} - \frac{\alpha^2}{c}\right)] + b[\alpha^2 - \dot{\lambda}_1 + \dot{F}_i(\alpha - \dot{\lambda}_2)] \right\} \end{aligned} \quad (2.96)$$

Agora, para a fase **C** da carga substitui-se (2.94) em (2.39) e obtém-se:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{CN'} = \dot{Z}_c \dot{I}_{cc} = & \frac{\dot{Z}_c \dot{V}}{\dot{Z}} \left\{ \frac{1}{\dot{Z}_{cap}} [-\dot{Z}_{sa}(\dot{\lambda}_1 + \dot{\lambda}_2 \dot{F}_i) \left(\frac{1}{b} - \frac{1}{c}\right) + \dot{Z}_{ap} \left(\frac{\alpha^2}{b} - \frac{\alpha}{c}\right) + \right. \\ & \left. + \dot{Z}_{an} \dot{F}_i \left(\frac{\alpha}{b} - \frac{\alpha^2}{c}\right)] - c[\alpha - \dot{\lambda}_1 + \dot{F}_i(\alpha^2 - \dot{\lambda}_2)] \right\} \end{aligned} \quad (2.97)$$

Quanto à forma com que a carga monofásica ou bifásica de acoplamento será conectada na carga trifásica tem-se:

1º) A carga trifásica está ligada em **Y** e o neutro é acessível.

Neste caso, as impedâncias por fase da carga trifásica serão chamadas de Z_{tri_a} , Z_{tri_b} e Z_{tri_c} , respectivamente às fases **A**, **B** e **C**, e a carga(s) de acoplamento R_A , R_B ou/e R_C entrará ou entrarão em paralelo com as respectivas impedâncias Z_{tri_a} , Z_{tri_b} e Z_{tri_c} ; conforme figura 2.7.

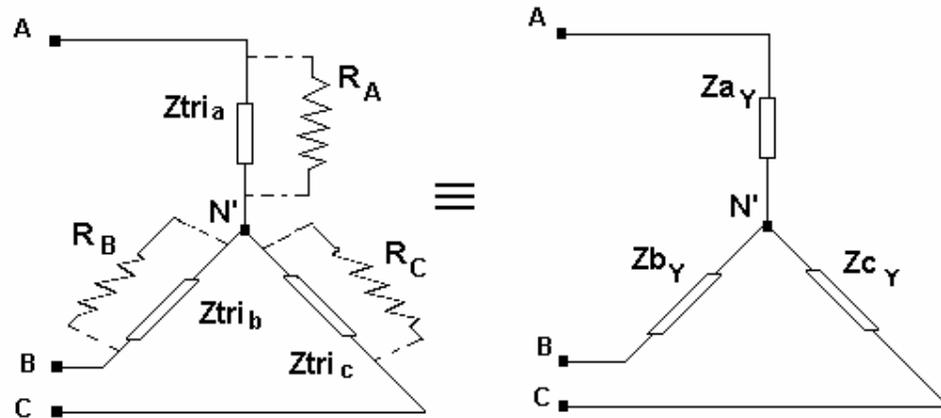


Figura 2.7 – Carga(s) de acoplamento em paralelo com a carga trifásica em Y

As impedâncias equivalentes do paralelismo serão dadas por Z_{a_Y} , Z_{b_Y} e Z_{c_Y} ; onde:

$$Z_{(a,b,c)} = Z_{(a,b,c)_Y} = \frac{R_{(A,B,C)} * Z_{tri(a,b,c)}}{R_{(A,B,C)} + Z_{tri(a,b,c)}} \quad (2.98)$$

2º) A carga trifásica está ligada em Δ .

Nesta situação, as impedâncias por fase da carga trifásica serão chamadas de $Z_{\Delta AB}$, $Z_{\Delta AC}$ e $Z_{\Delta BC}$, respectivamente às fases **AB**, **AC** e **BC**, e a carga(s) de acoplamento R_A , R_B ou/e R_C entrará ou entrarão em paralelo com as respectivas impedâncias $Z_{\Delta AB}$, $Z_{\Delta AC}$ e $Z_{\Delta BC}$; conforme figura 2.8.

As impedâncias equivalentes do paralelismo serão dadas por Z_{eqAB} , Z_{eqAC} e Z_{eqBC} ; onde:

$$Z_{eq(AB, AC, BC)} = \frac{R_{(A,B,C)} * Z_{(\Delta AB, \Delta AC, \Delta BC)}}{R_{(A,B,C)} + Z_{(\Delta AB, \Delta AC, \Delta BC)}} \quad (2.99)$$

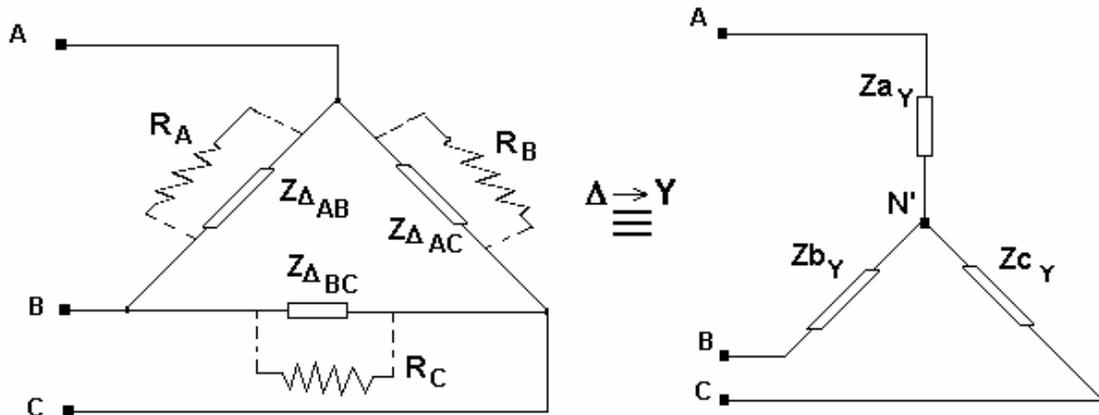


Figura 2.8 – Carga(s) de acoplamento em paralelo com a carga trifásica em Δ

As impedâncias equivalentes por fase em Y serão calculadas segundo as fórmulas de conversão de Δ para Y , abaixo:

$$Z_a = Z_{aY} = \frac{Z_{eqAB} * Z_{eqAC}}{Z_{eqAB} + Z_{eqBC} + Z_{eqAC}} \quad (2.100)$$

$$Z_b = Z_{bY} = \frac{Z_{eqAB} * Z_{eqBC}}{Z_{eqAB} + Z_{eqBC} + Z_{eqAC}} \quad (2.101)$$

$$Z_c = Z_{cY} = \frac{Z_{eqAC} * Z_{eqBC}}{Z_{eqAB} + Z_{eqBC} + Z_{eqAC}} \quad (2.102)$$

2.3.7 – Equações mecânicas

O conjugado eletromagnético total (já englobando o conjugado das perdas rotacionais) desenvolvido pela máquina de indução trifásica é dado por:

$$T = \frac{3P_{dR}}{W_r} \quad (2.103)$$

onde P_{dr} é a potência desenvolvida pelo rotor, também chamada de potência mecânica total.

O conjugado pode ser colocado em função apenas de potência, substituindo P_{dr} por P_{fr} (potência fornecida pelo rotor por fase) e W_r por W_s ; resultando em:

$$T = \frac{3P_{fr}}{W_s} \quad (2.104)$$

A potência fornecida pelo rotor por fase é igual à diferença entre as potências fornecidas pelo rotor, devido às impedâncias dos circuitos de seqüências positiva (Z_{ap}') e negativa (Z_{an}'). Portanto, tem-se:

$$P_{fr} = [\text{Re}(\dot{Z}_{ap}')] \cdot I_{ap}^2 - [\text{Re}(\dot{Z}_{an}')] \cdot I_{an}^2 \quad (2.105)$$

Como $I_{an} = F_i \cdot I_{ap}$ e $I_{ap} = V/Z$, tem-se para a equação (2.105):

$$P_{fr} = [\text{Re}(\dot{Z}_{ap}')] - [\text{Re}(\dot{Z}_{an}') \cdot F_i^2] \cdot \frac{V^2}{Z^2} \quad (2.106)$$

Substituindo (2.106) em (2.104), resulta em:

$$T = \frac{3V^2}{W_s \cdot Z^2} [\text{Re}(\dot{Z}_{ap}')] - [\text{Re}(\dot{Z}_{an}') \cdot F_i^2]. \quad (2.107)$$

A potência mecânica ou potência total desenvolvida pelo rotor ($3P_{dr}$), é dada por:

$$P_{mec} = 3P_{dr} = 3(1-s)P_{fk} = \frac{3V^2}{Z^2}(1-s)[\text{Re}(\dot{Z}_{ap}') - \text{Re}(\dot{Z}_{an}') \cdot F_i^2] \quad (2.108)$$

2.4 - Considerações Finais

Este capítulo teve como meta principal apresentar a fundamentação teórica e o equacionamento, no domínio da frequência, da máquina de indução trifásica assimétrica funcionando como gerador, acoplada a uma rede de distribuição monofásica, alimentando uma carga trifásica de impedância constante, com vistas à implementação de um programa computacional que reproduzisse a operação do sistema.

Para avaliar o desbalanceamento do sistema trifásico de tensões obtido nos terminais ABC do gerador, introduziu-se o fator de desbalanceamento (F). Este fator é definido tomando a relação entre os módulos das componentes simétricas de seqüência negativa e positiva; pois qualquer sistema trifásico desbalanceado pode ser decomposto nestas componentes. Portanto o menor desbalanceamento ocorrerá para o menor valor de F.

Para o cálculo do fator F, é necessário conhecer os valores dos parâmetros dos circuitos equivalentes da máquina de indução simétrica. Estes parâmetros serão levantados, através de ensaios, no próximo capítulo.

Nas considerações feitas sobre a carga trifásica, observar-se-á que um apropriado desequilíbrio na mesma, através da introdução de carga(s) monofásica(s) e/ou bifásica(s) em paralelo, pode ajudar também na diminuição do fator de desbalanceamento.

CAPÍTULO III

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO DO GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO ASSIMÉTRICO, E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO MODELO

3.1 - Considerações Iniciais

O gerador de indução trifásico assimétrico é obtido a partir de uma máquina de indução trifásica convencional.

Um determinado gerador assimétrico possui a carcaça, o estator magnético e o rotor em gaiola de esquilo simples, exatamente iguais ao de um motor trifásico comercial de mesma potência. A diferença está no enrolamento trifásico do estator, onde o número de espiras por fase, na máquina assimétrica, é diferente [2], isto é: $N_a \neq N_b \neq N_c$. Para o motor funcionar como gerador é necessário acioná-lo a uma velocidade acima da síncrona [21].

Para o desenvolvimento do projeto, inicialmente ensaia-se uma máquina de indução trifásica simétrica, comercial, visando à obtenção dos parâmetros de seu circuito equivalente (R_s , X_s , X_m , R_R' e X_R'), uma vez que para a máquina simétrica o circuito equivalente de uma fase é igual a das outras. Logo em seguida, os valores dos parâmetros do circuito equivalente são aplicados na modelagem apresentada no capítulo anterior.

A partir daí, é possível variar “b”, “c” e o valor do capacitor no sistema de equações do conjunto gerador assimétrico – rede monofásica – carga –

capacitor, equação (2.51), buscando-se o menor desbalanceamento entre as tensões que alimentam a carga trifásica. O projeto do gerador assimétrico poderá ser norteado também pelos valores de “b”, “c” e “Cap”, que resultassem em valores de conjugado “T” muito próximos ou iguais ao nominal, tal que na condição de corrente nominal o gerador fornecesse aproximadamente ou exatamente a potência nominal.

A partir do conhecimento das equações que representam o comportamento do sistema é desenvolvido um programa computacional, utilizado para simular o comportamento das grandezas envolvidas no processo, no domínio da frequência; utilizando para tal o MICROSOFT EXCEL.

Objetivando a validação do modelo apresentado, é possível escolher diversos conjuntos de valores de “b”, “c” e “Cap” de maneira a atender as condições ótimas de projeto. Desta forma, têm-se os elementos para projetar e construir o gerador de indução trifásico assimétrico.

3.2 – Ensaios da máquina de indução trifásica simétrica

Para que seja feito o levantamento dos parâmetros do circuito equivalente da máquina de indução trifásica simétrica é necessário realizar os seguintes ensaios:

- ❖ Ensaio com o rotor em vazio
- ❖ Ensaio com o rotor bloqueado e
- ❖ Medição de resistência do enrolamento do estator à temperatura nominal de funcionamento.

Para avaliar os resultados obtidos a partir dos ensaios anteriormente mencionados, ensaia-se a máquina simétrica com tensão e rotação nominais, comparando os resultados deste ensaio com os teóricos obtidos quando da aplicação da tensão e escorregamento nominais no circuito equivalente construído com os parâmetros obtidos anteriormente.

A máquina de indução trifásica simétrica original tem os seguintes dados de placa:

❖ Modelo:	C 73 A – ARNO
❖ Potência:	20 CV
❖ Frequência:	60 Hz/50Hz
❖ Rotação:	1750 rpm
❖ Conexão Δ :	
tensão:	220 V
corrente:	50 A
❖ Conexão Y :	
tensão:	380 V
corrente:	28,5 A
❖ Proteção:	IP54
❖ I_p/I_n :	4,8
❖ FS:	1,0
❖ Isol:	B
❖ Cat:	N
❖ Regime contínuo	
❖ N.º de Pólos:	4
❖ N.º de Fases:	3
❖ N.º de Espiras por fase:	48

❖ Passo:	11
❖ Grupo:	4 (GÊMEAS)
❖ Fiação:	4 x 19 (AWG)
❖ Ligação Série / Paralela:	6 Pontas
❖ Diâmetro Interno:	19,7 cm
❖ N.º de Ranhuras:	48
❖ N.º de Bobinas por Ranhura:	1/2

O principal aparelho de medição utilizado nos ensaios foi o **Medidor Saga 4000 – Analisador de Energia**.

O analisador Saga 4000 é um equipamento portátil multigrandeza e multifunção, utilizando a mais avançada tecnologia de aquisição digital de sinais e de processamento numérico em tempo real. Foi utilizado nos ensaios para medir tensão, corrente, potência, fator de potência e frequência, sendo que as grandezas medidas podem ser trifásicas e/ou monofásicas.

As características gerais, elétricas e metrológicas do Saga 4000 se encontram detalhadas no item A.2 do **Anexo A**.

As fotografias relativas aos ensaios são apresentadas no **Anexo B**.

3.2.1 – Ensaio com o rotor em vazio

Tomando-se a máquina convencional com conexão triângulo no estator e alimentando-a com tensão nominal, frequência nominal e rotor em vazio, verifica-se os valores de tensão, corrente e potência elétrica de entrada; conforme indicado no esquema de ligação da figura 3.1.

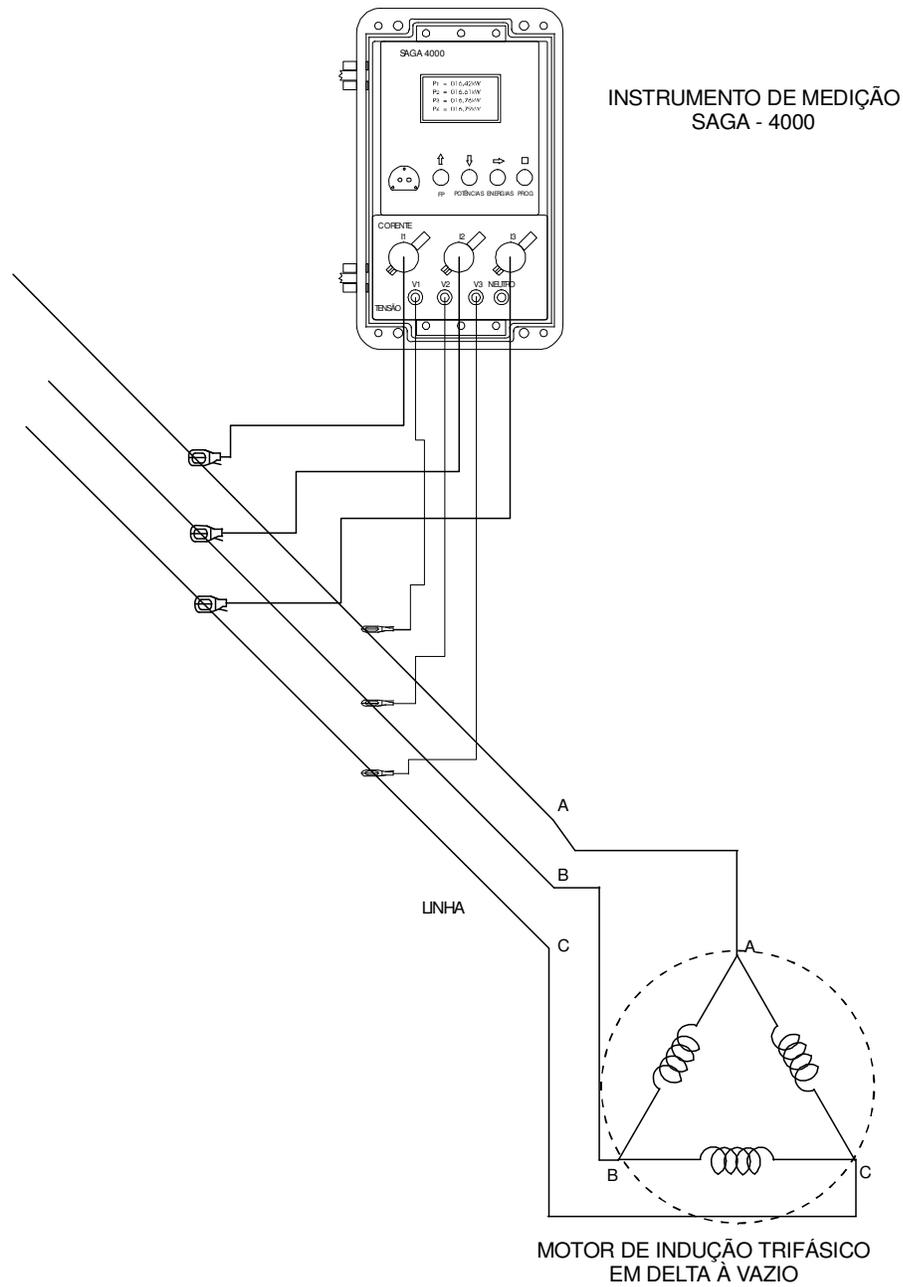


Figura 3.1 – Detalhes de ligação do instrumento de medição para o ensaio em vazio

$P_{0(A,B,C)}$, $I_{0(A,B,C)}$ e $V_{0(A,B,C)}$ representam a potência, tensão e corrente por fase, respectivamente nas fases **A**, **B** e **C**. W_{r_0} é a rotação da máquina em vazio.

Os resultados obtidos deste ensaio estão na tabela 3.1.

TABELA 3.1 – VALORES OBTIDOS NO ENSAIO EM VAZIO					
P_{0A} (W)	P_{0B} (W)	P_{0C} (W)	V_{0A} (V)	V_{0B} (V)	V_{0C} (V)
120 ± 2,0	160 ± 2,0	150 ± 2,0	221,04±1,5	220,84±1,5	220,51±1,5
I'_{0A} (A)	I'_{0B} (A)	I'_{0C} (A)	W_{r_0} (rpm)		
11,71±0,01	11,47±0,01	11,96±0,01	1796±2		

Sendo P_0 a potência média por fase, tem-se:

$$P_0 = \frac{P_{0A} + P_{0B} + P_{0C}}{3} \quad (3.1)$$

Como $I'_{0(A,B,C)}$ é a corrente de linha respectivamente nos terminais **A**, **B** e **C** do estator, tem-se:

$$I_0 = \frac{I'_{0A} + I'_{0B} + I'_{0C}}{3 * \sqrt{3}} \quad (3.2)$$

Para a ligação em delta do estator a tensão de linha V'_0 é igual a V_0 . Portanto, tem-se a tensão média dada por:

$$V_0 = \frac{V_{0A} + V_{0B} + V_{0C}}{3} \quad (3.3)$$

A partir dos valores da tabela 3.1, calcula-se os valores em (3.1), (3.2) e (3.3) obtendo-se a tabela 3.2.

<i>TABELA 3.2 – VALORES CALCULADOS: ENSAIO EM VAZIO</i>		
P_0 (W)	V_0 (V)	I_0 (A)
143,33 ± 2,0	220,80 ± 1,5	6,76 ± 0,01

3.2.2 – Ensaio com o rotor bloqueado

Como o próprio nome já diz, este é um ensaio com o rotor da máquina travado. A tensão que é aplicada no estator em Δ , com frequência nominal, é reduzida para se obter a corrente nominal. Obtêm-se os valores de tensão, corrente e potência através do circuito indicado na figura 3.2.

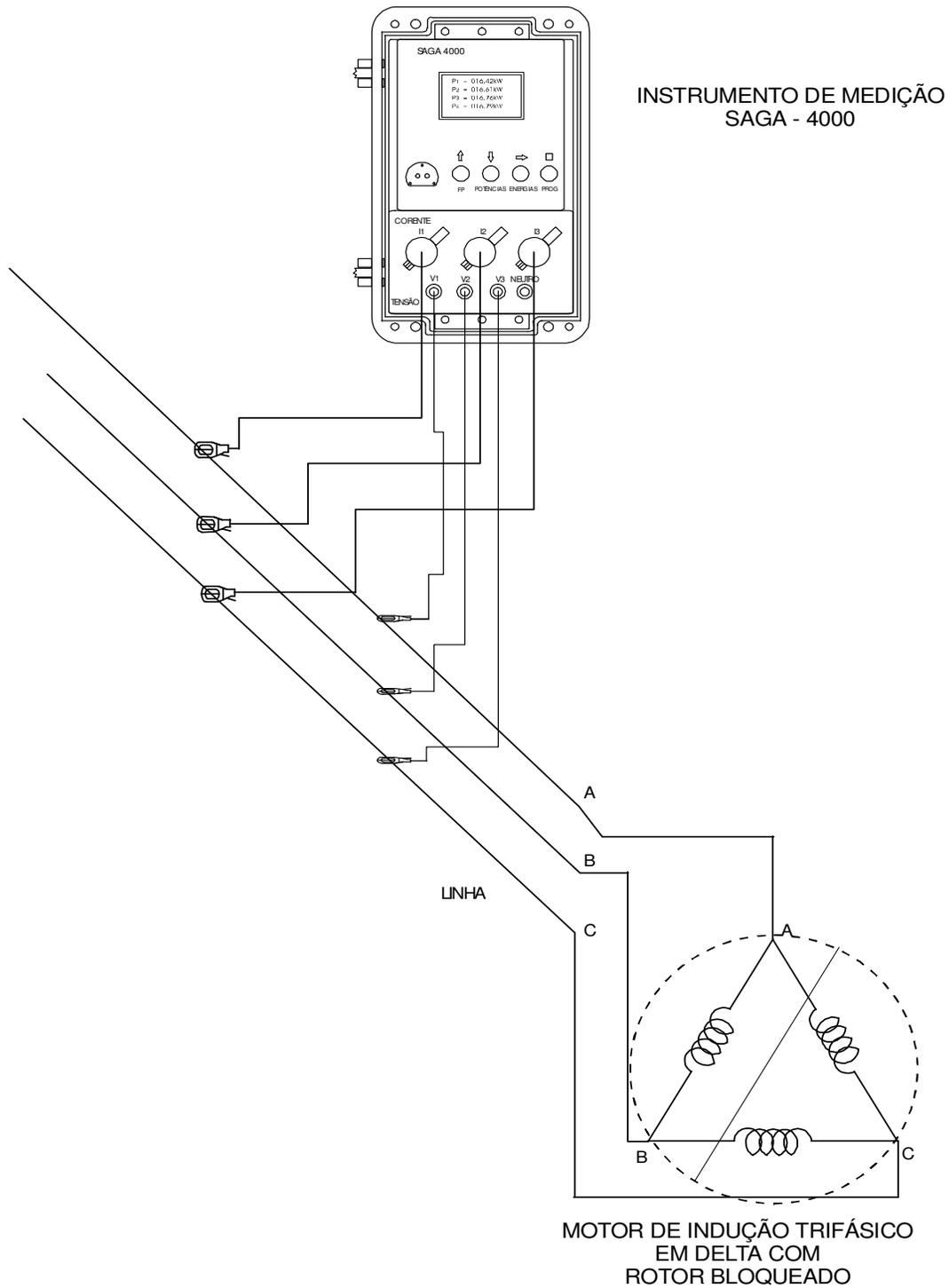


Figura 3.2 – Detalhes de ligação do instrumento de medição para o ensaio com o rotor bloqueado

Analogamente ao teste em vazio, obtém-se os resultados das tabelas 3.3 e 3.4; onde $P_{b(A,B,C)}$, $I_{b(A,B,C)}$ e $V_{b(A,B,C)}$ representam a potência, tensão e corrente por fase, respectivamente nas fases **A**, **B** e **C**, com o rotor bloqueado. W_{r_b} , a rotação da máquina com o rotor bloqueado é igual a zero.

Os resultados obtidos deste ensaio estão na tabela 3.3.

TABELA 3.3 – VALORES OBTIDOS NO ENSAIO COM ROTOR BLOQUEADO					
P_{bA} (W)	P_{bB} (W)	P_{bC} (W)	V_{bA} (V)	V_{bB} (V)	V_{bC} (V)
460 ± 3,0	470 ± 3,0	480 ± 3,0	136,17±1,0	136,17±1,0	136,17±1,0
I'_{bA} (A)	I'_{bB} (A)	I'_{bC} (A)	W_{r_b} (rpm)		
49,53±0,05	49,07±0,05	49,07±0,05	0,00		

Sendo P_b a potência média por fase, tem-se:

$$P_b = \frac{P_{bA} + P_{bB} + P_{bC}}{3} \quad (3.4)$$

Como $I'_{b(A,B,C)}$ é a corrente de linha respectivamente nos terminais **A**, **B** e **C** do estator, tem-se:

$$I_b = \frac{I'_{bA} + I'_{bB} + I'_{bC}}{3 * \sqrt{3}} \quad (3.5)$$

Para a ligação em delta do estator a tensão de linha V'_b é igual a V_b . Portanto, tem-se a tensão média dada por:

$$V_b = \frac{V_{bA} + V_{bB} + V_{bC}}{3} \quad (3.6)$$

A partir dos valores da tabela 3.3, calcula-se os valores em (3.4), (3.5) e (3.6) obtendo-se a tabela 3.4.

<i>TABELA 3.4 – VALORES CALCULADOS: ENSAIO COM ROTOR BLOQUEADO</i>		
P_b (W)	V_b (V)	I_b (A)
$463,73 \pm 3,0$	$136,17 \pm 1,0$	$28,42 \pm 0,05$

3.2.3 – Medição da resistência do estator

A resistência por fase do estator do motor é medida diretamente nos bornes do motor desligado, através de um multímetro, logo após o ensaio a rotor bloqueado. O valor encontrado foi:

$$R_s = 0,47 \pm 0,01 \Omega$$

3.3 – Cálculo dos parâmetros dos circuitos equivalentes – novo método

Os parâmetros dos circuitos equivalentes a serem utilizados, foram definidos no capítulo II e são: R_s , X_s , X_m , R_R' e X_R' . A partir dos resultados dos testes descritos nos ensaios e das confrontações do circuito equivalente da figura 3.3 com o da figura 3.4 e da figura 3.5 com o da figura 3.6, se calcula os parâmetros mencionados anteriormente.

No processo do cálculo dos parâmetros, em relação às referências bibliográficas [2] e [5], é apresentada uma forma nova de se calcular tais parâmetros. Este processo consiste em se calcular uma das incógnitas de um sistema de equações, no caso X_m , e em função do resultado obtido calcula-se as outras incógnitas; conforme tabela 3.5.

Do ensaio com o rotor em vazio, pode-se construir o circuito equivalente da figura 3.3.

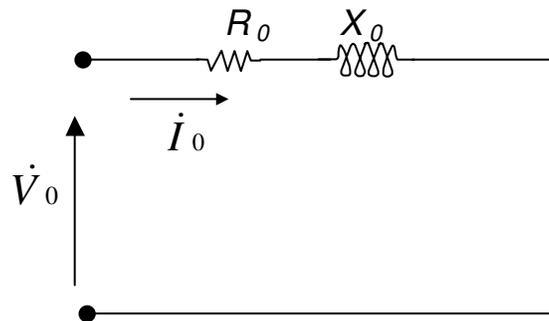


Figura 3.3 – Circuito do motor em vazio

Ainda com o rotor em vazio, do circuito equivalente do motor pode-se obter o circuito da figura 3.4.

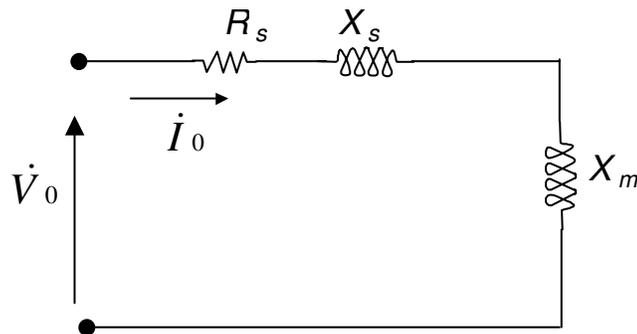


Figura 3.4 – Circuito equivalente do motor à vazio

É importante observar que a condição do motor em vazio na prática não é exatamente com $s = 0$. Na realidade uma parcela da componente ativa de corrente em vazio se dá devido às perdas rotacionais [1,2].

Por outro lado, do ensaio com o rotor bloqueado pode-se obter o circuito da figura 3.5.

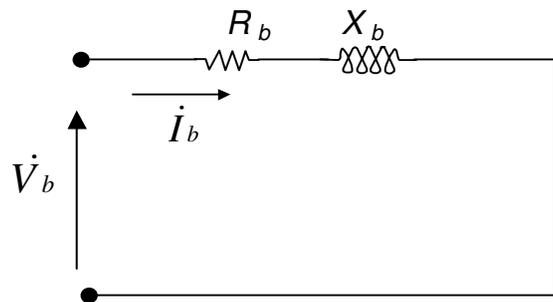


Figura 3.5 – Circuito do motor com rotor bloqueado

Do circuito equivalente do motor pode-se obter o circuito da figura 3.6 para o rotor bloqueado.

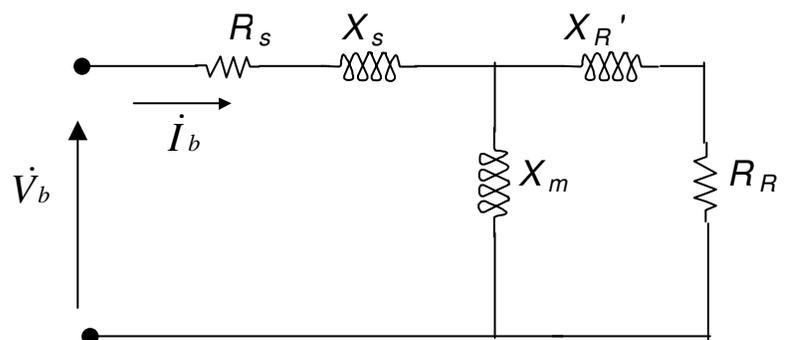


Figura 3.6 – Circuito equivalente do motor com rotor bloqueado

Na figura 3.6, a impedância $\dot{Z} = R_{R'} + jX_{R'}$ em paralelo com a impedância jX_m é dada por \dot{Z}_{eq} ; conforme abaixo:

$$\dot{Z}_{eq} = \frac{jX_m(R_{R'} + jX_{R'})}{R_{R'} + j(X_m + X_{R'})} \quad (3.7)$$

ou, multiplicando e dividindo (3.7) pelo conjugado do seu próprio denominador, tem-se:

$$\dot{Z}_{eq} = \frac{X_m^2 \cdot R_{R'} + j(X_m \cdot R_{R'}^2 + X_{R'} \cdot X_m^2 + X_m \cdot X_{R'}^2)}{R_{R'}^2 + (X_m + X_{R'})^2} \quad (3.8)$$

ou ainda:

$$\dot{Z}_{eq} = \frac{X_m^2 \cdot R_{R'}}{R_{R'}^2 + (X_m + X_{R'})^2} + j \frac{X_m \cdot (R_{R'}^2 + X_{R'} \cdot X_m + X_{R'}^2)}{R_{R'}^2 + (X_m + X_{R'})^2} = R_{eq} + jX_{eq} \quad (3.9)$$

Comparando os circuitos das figuras 3.5 e 3.6, e considerando (3.9) obtêm-se as equações (3.10.a) e (3.10.b). Comparando também os circuitos das figuras 3.3 e 3.4, obtêm-se as equações (3.11.a) e (3.11.b).

$$X_b = X_s + X_{eq} \quad (3.10.a)$$

$$R_b = R_s + R_{eq} \quad (3.10.b)$$

$$X_0 = X_s + X_m \quad (3.11.a)$$

$$R_0 = R_s \quad (3.11.b)$$

Definindo $\Delta X = X_0 - X_b$ e observando (3.11), (3.10) e (3.9), obtêm-se a equação (3.12) e conseqüentemente a (3.13).

$$\Delta X = X_0 - X_b = X_m - X_{eq} = X_m - \frac{X_m \cdot (R_R'^2 + X_R' \cdot X_m + X_R'^2)}{R_R'^2 + (X_m + X_R')^2} \quad (3.12)$$

$$\Delta X = \frac{X_m^2 (X_R' + X_m)}{R_R'^2 + (X_m + X_R')^2} \quad (3.13)$$

Agora definindo $\Delta R = R_b - R_s = R_{eq}$ e observando (3.9), tira-se:

$$\Delta R = \frac{X_m^2 \cdot R_R'}{R_R'^2 + (X_m + X_R')^2} \quad (3.14)$$

Para encontrar uma equação do 2º grau, cuja incógnita seja X_m , precisa-se da relação $\Delta R/\Delta X$. Portanto tem-se:

$$\frac{\Delta R}{\Delta X} = \frac{R_R'}{X_m + X_R'} \quad (3.15)$$

Para completar o sistema das equações que permitem obter os parâmetros do circuito equivalente é adotada uma equação empírica, que relaciona X_s com X_R' através de um coeficiente, K_c , que depende da categoria da máquina testada [2]. Para a categoria da máquina em estudo, categoria A, pode-se escolher K_c igual a unidade. Sendo assim, tem-se (3.16). Combinando, agora, (3.11) com (3.16), obtém-se a equação (3.17).

$$X_s = K_c \cdot X_R' \quad (3.16)$$

$$X_R' = \frac{X_0 - X_m}{K_c} \quad (3.17)$$

Finalmente substituindo $R_R'^2$, tirado de (3.13), e X_R' , tirado de (3.17), em (3.15) elevado ao quadrado, encontra-se a equação procurada (3.18):

$$aX_m^2 + bX_m + c = 0 ; \text{ onde:} \quad (3.18)$$

$$a = 1 ,$$

$$b = \frac{(1 - K_c)}{K_c} \cdot \frac{(\Delta R^2 + \Delta X^2)}{\Delta X} \quad e$$

$$c = - \frac{X_0}{K_c} \cdot \frac{(\Delta R^2 + \Delta X^2)}{\Delta X}$$

Sendo assim, as equações que permitem o cálculo dos parâmetros do circuito equivalente da máquina foram resumidas na tabela 3.5.

TABELA 3.5 – EQUAÇÕES QUE PERMITEM O CÁLCULO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE DA MÁQUINA		
Parâmetros	Observações	Equações
$X_m = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4c}}{2}$	$a = 1$ $b = \frac{(1 - K_c)}{K_c} \cdot \frac{(\Delta R^2 + \Delta X^2)}{\Delta X}$ $c = - \frac{X_0}{K_c} \cdot \frac{(\Delta R^2 + \Delta X^2)}{\Delta X}$	(3.18)
$X_{R'} = \frac{X_0 - X_m}{K_c}$	K_c é um coeficiente que depende da categoria da máquina testada. Para a categoria A, $K_c = 1$.	(3.17)
$R_{R'} = \frac{\Delta R}{\Delta X} \cdot (X_m + X_{R'})$	$\Delta R = R_b - R_s$ $\Delta X = X_0 - X_b$	(3.15)
$X_s = K_c \cdot X_{R'}$		(3.16)
$R_s = 0,47 \pm 0,01 \Omega$	Valor medido nos bornes da máquina desligada, imediatamente após o ensaio com o rotor bloqueado.	

Na tabela anterior, a partir do cálculo do parâmetro X_m os outros parâmetros, X_R' e R_R' , podem ser calculados em seguida.

O processo de cálculo dos parâmetros, desenvolvido aqui, é direto (não iterativo) e não apresenta nenhuma aproximação nos desenvolvimentos matemáticos apresentados.

Os parâmetros X_0 , X_b e R_b , que aparecem na tabela 3.5, são calculados a partir dos valores de potência, tensão e corrente de fase; obtidos nos testes a vazio e bloqueado, segundo tabelas 3.2 e 3.4. Estes parâmetros são calculados segundo as expressões abaixo.

$$X_0 = \sqrt{\left(\frac{V_0}{I_0}\right)^2 - \left(\frac{P_0}{I_0^2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{V_0}{I_0}\right)^2 - R_0^2} \quad (3.19)$$

$$X_b = \sqrt{\left(\frac{V_b}{I_b}\right)^2 - \left(\frac{P_b}{I_b^2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{V_b}{I_b}\right)^2 - R_b^2} \quad (3.20)$$

$$R_b = \frac{P_b}{I_b^2} \quad (3.21)$$

Realizando os cálculos referentes às equações (3.19), (3.20) e (3.21), obtém-se a tabela 3.6:

<i>TABELA 3.6 – VALORES DOS PARÂMETROS: X_0, X_b e R_b</i>		
X_0	X_b	R_b
(Ω)	(Ω)	(Ω)
32,50 ± 0,01	4,76 ± 0,01	0,57 ± 0,01

Aplicando, os valores da tabela 3.6, o valor de K_c e o valor de R_s na tabela 3.5, obtém-se os valores dos parâmetros do circuito equivalente. Os resultados estão apresentados na tabela 3.7.

R_s (Ω /fase)	X_s (Ω /fase)	X_m (Ω /fase)	X_R' (Ω /fase)	R_R' (Ω /fase)
0,47±0,01	2,47±0,012	30,03±0,017	2,47±0,012	0,12±0,022

3.4 – Ensaio em carga

Os resultados obtidos neste ensaio serão comparados com os resultados obtidos através da aplicação dos valores dos parâmetros (tabela 3.7) no circuito equivalente da máquina; para a condição de tensão, frequência e escorregamento nominais aplicados à máquina. O objetivo desta comparação é verificar a precisão dos parâmetros do circuito equivalente, obtidos anteriormente.

No ensaio, obtém-se os valores de tensão, corrente e potência através do esquema descrito na figura 3.7. O aparelho de medição é o Saga 4000, o motor foi colocado em Δ e uma carga mecânica foi acoplada ao eixo do motor; conforme foto apresentada no **Anexo B**.

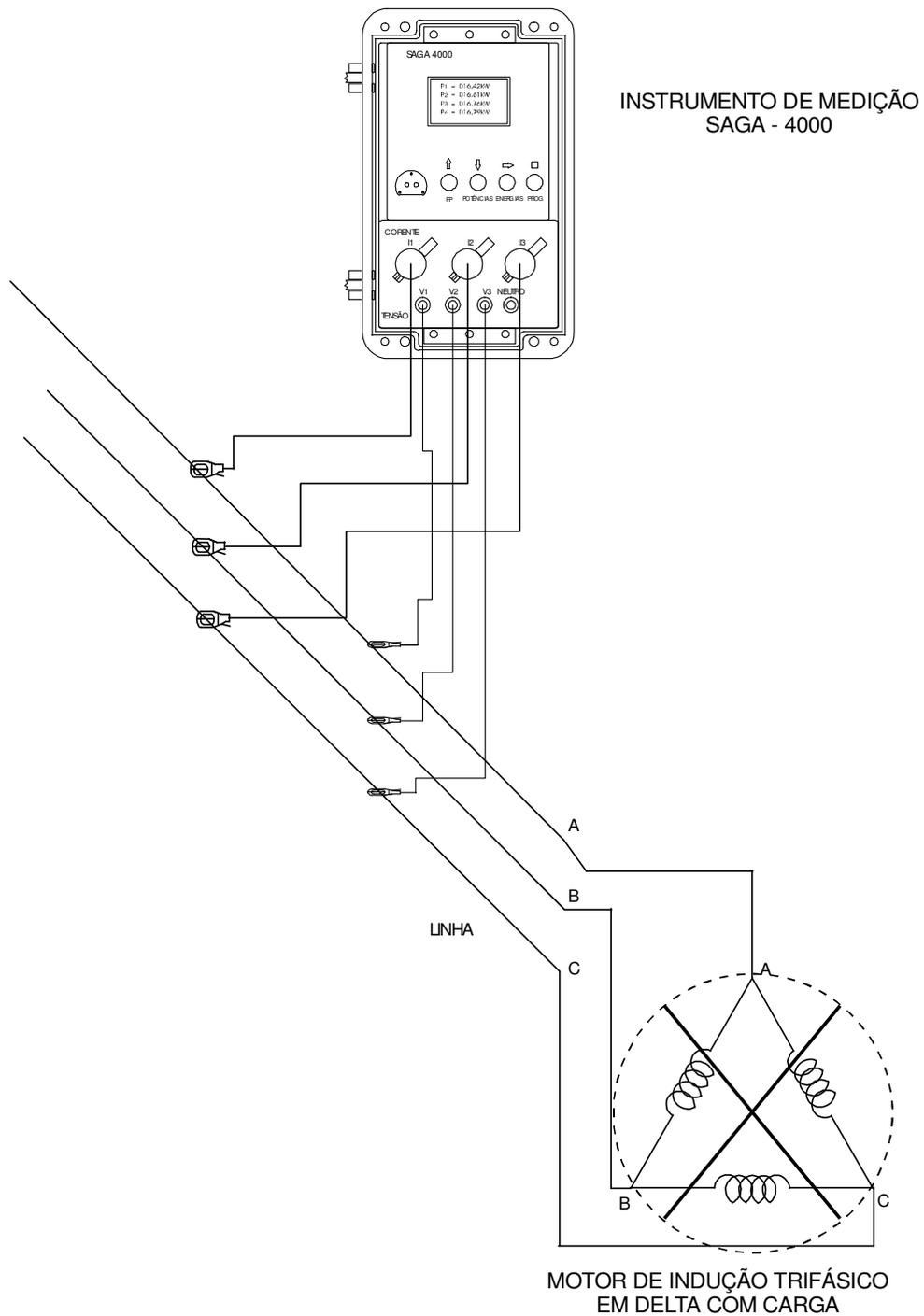


Figura 3.7 – Detalhes de ligação do instrumento de medição para o ensaio com carga

Os resultados do ensaio em carga são apresentados nas tabelas 3.8 e 3.9; onde $P_{(A,B,C)}$, $I_{(A,B,C)}$ e $V_{(A,B,C)}$ representam a potência, tensão e corrente por fase, respectivamente nas fases **A**, **B** e **C**. W_r é a velocidade mecânica do rotor, cujo valor foi medido com um tacômetro digital.

Os resultados obtidos deste ensaio estão na tabela 3.8.

TABELA 3.8 – VALORES OBTIDOS NO ENSAIO COM CARGA					
P_A (W)	P_B (W)	P_C (W)	V_A (V)	V_B (V)	V_C (V)
5.540±3,0	5.670±3,0	5.590±3,0	213,68±1,0	214,22±1,0	213,04±1,0
I'_A (A)	I'_B (A)	I'_C (A)	W_r (rpm)		
49,56±0,05	50,53±0,05	49,80±0,05	1758±2		

Sendo P a potência média por fase, tem-se:

$$P = \frac{P_A + P_B + P_C}{3} \quad (3.22)$$

Como $I'_{(A,B,C)}$ é a corrente de linha respectivamente nos terminais **A**, **B** e **C** do estator, tem-se:

$$I = \frac{I'_A + I'_B + I'_C}{3 * \sqrt{3}} \quad (3.23)$$

Para a ligação em delta do estator a tensão de linha V' é igual a V . Portanto, tem-se a tensão média dada por:

$$V = \frac{V_A + V_B + V_C}{3} \quad (3.24)$$

A partir dos valores da tabela 3.8, calcula-se os valores em (3.22), (3.23) e (3.24) obtendo-se a tabela 3.9.

TABELA 3.9 – VALORES CALCULADOS: ENSAIO COM CARGA			
P (W)	V (V)	I (A)	$\cos\phi$
5.600 ± 3,0	213,65 ± 1,0	28,85 ± 0,05	0,9 ± 0,01

O escorregamento, para esta carga, é:

$$s = \frac{W_s - W_r}{W_s} = \frac{1800 - 1758}{1800} = 0,0233 \text{ ou } 2,33 \%$$

Agora, aplicando ao circuito equivalente da máquina, figura 3.8, a tensão e o escorregamento nas condições de ensaio em carga obtém-se a tabela 3.10:

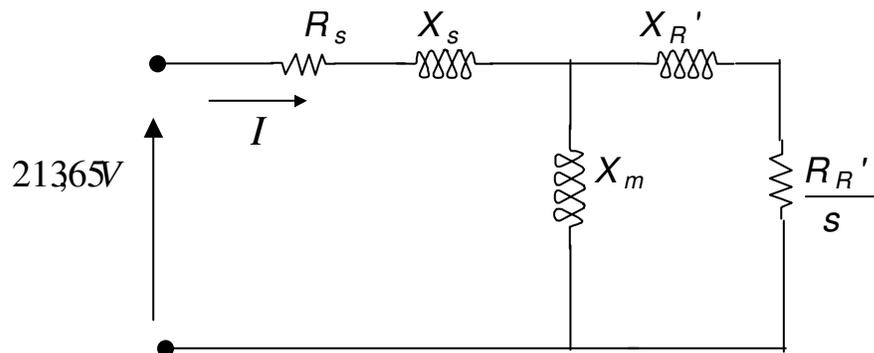


Figura 3.8 – Circuito equivalente da máquina com carga

TABELA 3.10 – VALORES DAS VARIÁVEIS DA MÁQUINA CALCULADAS A PARTIR DO CIRCUITO EQUIVALENTE, POR FASE

P (W)	V (V)	I (A)	$\cos\phi$
4.143,20±3,0	213,65±1,0	29,20±0,05	0,66±0,01

Comparando as tabelas 3.9 e 3.10, observa-se que a diferença entre as correntes, referidas à situação ensaiada, é de 1,21% .

3.5 – Implementação computacional do modelo e projeto do gerador assimétrico

As condições ótimas de projeto – fatores de desbalanceamento de tensão e corrente os menores possíveis para o sistema, sem exceder a potência nominal do gerador – são mais rapidamente conseguidas através das simulações computacionais, pois seria trabalhoso e dispendioso somente com os ensaios experimentais encontrá-las; em função do grande conjunto de valores possíveis para **b**, **c** e **Cap** que resultam em condições ótimas. Sendo assim, paralelamente aos estudos práticos, procedeu-se a um estudo computacional através da implementação de um modelo que reproduzisse o desempenho do sistema real, respeitadas as considerações impostas ou as limitações de ordem prática.

Os modelos matemáticos descritos no capítulo II foram implementados num programa computacional de aplicação de planilhas de cálculo, o *MICROSOFT[®] EXCEL*. O fato de o Microsoft Excel ser acessível a uma variedade de sistemas operacionais de computadores pessoais, além de sua participação dominante no mercado, fez deste programa uma escolha apropriada

para esta simulação que não requer cálculos diferenciais e integrais, já que o tratamento é fasorial (domínio da frequência).

3.5.1 – Implementação computacional

Conforme mencionado anteriormente, o Excel é um software de aplicação de planilhas de cálculo e realiza todos os cálculos aritméticos necessários através da criação de fórmulas, utilizando para isto os operadores aritméticos da adição, subtração, multiplicação, divisão e exponenciação. No Excel existem muitas outras instruções pré-programadas, denominadas funções. Algumas utilizadas nesta implementação[18,19,20].

Recursos da caixa de ferramentas de controle do Microsoft Visual Basic foram utilizados para darem maior dinâmica às simulações [26].

Para que o modelo no domínio da frequência fosse simulado, foi necessário, basicamente, desenvolver fórmulas que possibilitaram a relação entre a forma *polar* e a forma *retangular* de um número complexo. Sendo assim, para um dado exemplo, tem-se a tabela 3.11:

TABELA 3.11 – EXEMPLO DE TRANSFORMAÇÃO DA FORMA POLAR PARA A FORMA RETANGULAR

L \ C	A	B	C	D	E	F	G	H	I
59				4,78E+00	-36,26	=>	3,85E+00	+ j	-2,83E+00

Fórmula que dá a parte real:
=D59*COS(E59*PI()/180)

Fórmula que dá a parte imaginária:
=D59*SEN(E59*PI()/180).

Onde, por exemplo, “D59” corresponde à coluna “D” e à linha “59”.

A transformação de retangular para polar segue raciocínio análogo ao anterior. Portanto tem-se a tabela 3.12.a:

TABELA 3.12.a – EXEMPLO DE TRANSFORMAÇÃO DA FORMA RETANGULAR PARA A FORMA POLAR

L \ C	A	B	C	D	E	F	G	H	I
61				1,71E+01	116,27	<=	-7,56E+00	+ j	1,53E+01

Fórmula que dá o módulo:

$$=RAIZ(G61^2+I61^2)$$

Fórmula que dá o ângulo:

$$=SE(D61;SE(I61;ACOS(G61/D61)*180/PI()*SINAL(I61);ACOS(G61/D61)*180/PI());0).$$

Onde, por exemplo, “I61” corresponde à coluna “I” e à linha “61”.

A tabela 3.12.b diz respeito aos recursos do Microsoft Visual Basic utilizados.

TABELA 3.12.b – RECURSOS DO MICROSOFT VISUAL BASIC UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES

Nome do recurso utilizado	Características	Recurso
Scrollbar	Barra de rolagem: Utilizada para produzir variações rápidas e contínuas nos parâmetros ou variáveis a ele associado; dando dinamismo às simulações.	
CommandButton	Botão de comando: Utilizado, neste caso, para levar os valores das variáveis e/ou parâmetros para uma condição pré-estabelecida.	

3.5.2 – Projeto do gerador assimétrico

O protótipo é projetado a partir das equações do sistema desenvolvidas no capítulo II e dos resultados dos ensaios realizados neste capítulo.

Nas figuras do tipo 3.9, 3.10 e 3.11(a), a seguir, os gráficos são de barras e nas do tipo 3.11(b) os gráficos são cilíndricos.

Nos gráficos do tipo 3.10, de balanço de potências, a seguir, os valores negativos representam potências consumidas e os positivos representam potências geradas (fornecidas). A soma das potências nas fases **A**, **B** e **C** resulta na potência do gerador.

Os valores dos parâmetros e das variáveis mostradas na tabela 3.13 são dados em: Capacitor (F), impedâncias e resistências (Ω), W_r (rpm) e tensão (V).

As impedâncias da carga trifásica em **Y**, normalmente equilibrada, as quais o gerador assimétrico originalmente se propõe alimentar, serão denominadas por Z_{tri_a} , Z_{tri_b} e Z_{tri_c} . Se a carga trifásica estiver ligada em Δ , em Z_{tri_a} , Z_{tri_b} e Z_{tri_c} já aparecem os valores resultantes da conversão de Δ para **Y**.

Assim, as impedâncias Z_{a_Y} , Z_{b_Y} e Z_{c_Y} sempre representam o equivalente, em **Y**, do paralelo entre a carga trifásica original (Z_{tri_a} , Z_{tri_b} e Z_{tri_c}) e a carga de acoplamento; conforme está ilustrado nas figuras 2.7 e 2.8. As resistências R_A , R_B e R_C representam as impedâncias da carga de acoplamento. Portanto, Z_{a_Y} , Z_{b_Y} e Z_{c_Y} representam respectivamente as impedâncias Z_a , Z_b e Z_c , as quais aparecem nos equacionamentos do capítulo anterior.

O memorial de cálculo produzido pelo programa computacional com as características elétricas do sistema para a combinação de **b**, **c** e **Cap** relativa a uma condição do gerador com carga, correlacionado à tabela de dados 3.16 e às figuras 3.18, 3.19 e 3.20, é mostrado no **Anexo A**.

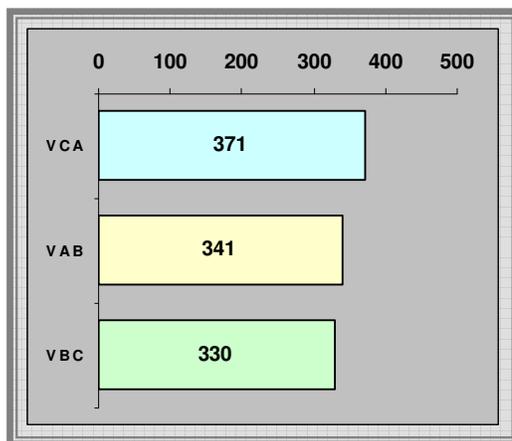
As simulações envolvem duas situações: Gerador funcionando a vazio e gerador funcionando com carga.

3.5.2.1 – Simulação do gerador de indução trifásico assimétrico sem carga

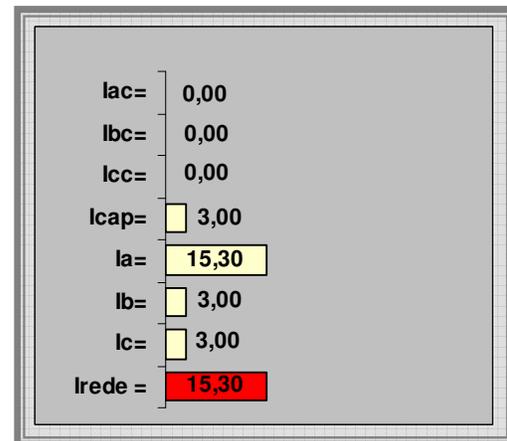
❖ 1ª Combinação: Considerando uma tensão da rede monofásica de 220 volts aplicada diretamente ao enrolamento da fase A do estator do gerador assimétrico, o gerador em vazio e os dados da tabela 3.13, obtêm-se as tensões e correntes, potências, fator de desbalanceamento e conjugado, no sistema; ilustrados respectivamente nas figuras 3.9, 3.10 e 3.11.

TABELA 3.13 – DADOS

Cap (F)	b	c	Wr (rpm)	Ztri _a (Ω)	Ztri _b (Ω)	Ztri _c (Ω)
2,41E-05	0,95	1	1.803	XXX	XXX	XXX
R _A (Ω)	R _B (Ω)	R _C (Ω)	Za _Y (Ω)	Zb _Y (Ω)	Zc _Y (Ω)	V _{Rede} (V)
XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	220 ∠0°



(a)



(b)

Figura 3.9 – (a) Valores das tensões nos terminais do gerador (Volt), (b) valores relativos às correntes na carga, no capacitor, no gerador e da rede (Ampère).

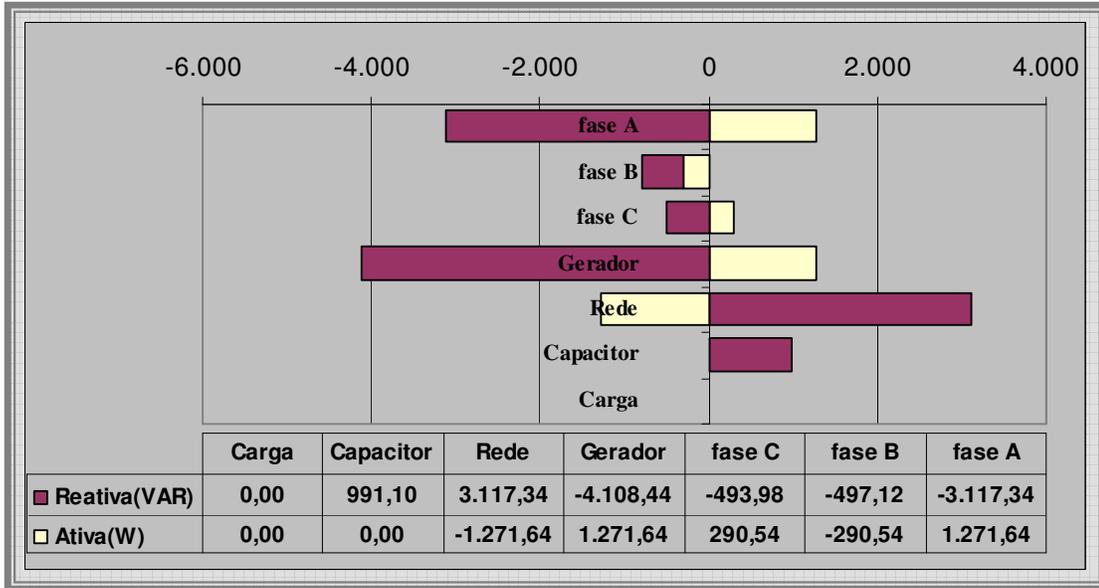


Figura 3.10 – Balanço entre as potências do gerador, rede, carga e capacitor

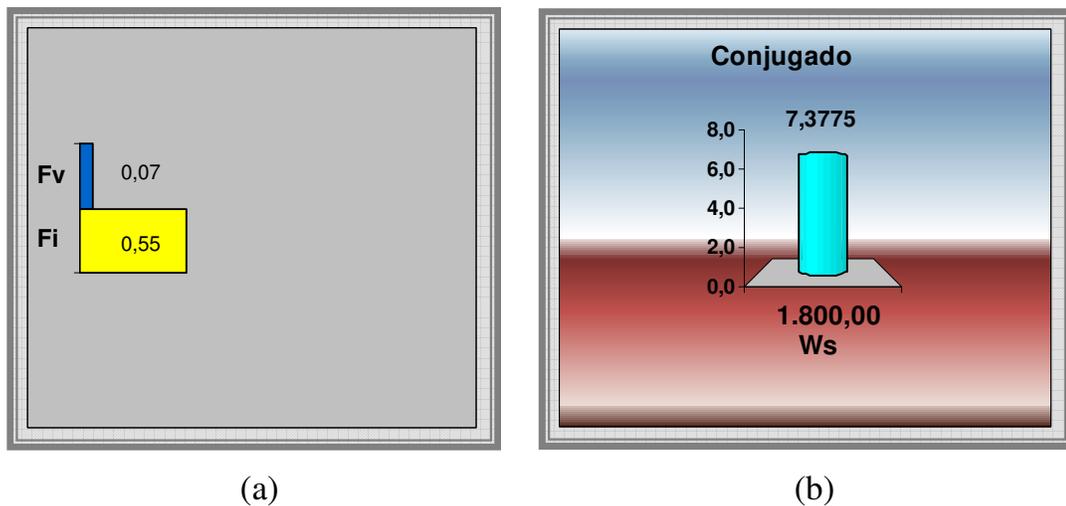
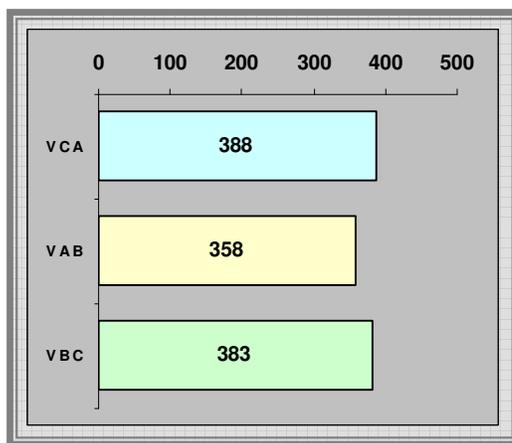


Figura 3.11 – (a) Fator de desbalanceamento de tensão e de corrente, (b) conjugado eletromagnético (N.m) e valor da velocidade síncrona (rpm)

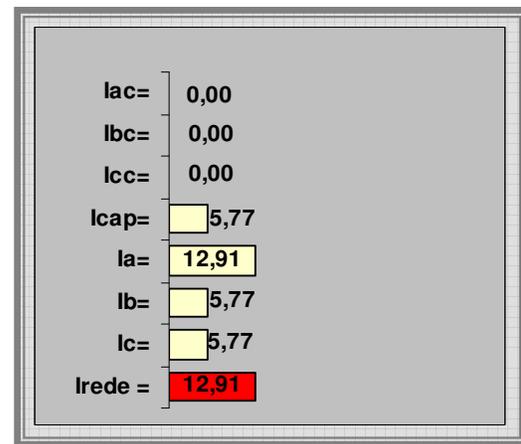
❖ 2ª Combinação: Considerando a tensão da rede monofásica de 220 volts, o gerador em vazio e os dados da tabela 3.14, obtém-se as tensões e correntes, potências, fator de desbalanceamento e conjugado, no sistema; ilustrados respectivamente nas figuras 3.12, 3.13 e 3.14. Nesta simulação, foi alterado somente o valor do capacitor comparativamente à tabela de dados 3.13; obtendo-se, aqui, um menor fator de desbalanceamento.

TABELA 3.14 – DADOS

Cap (F)	b	c	Wr (rpm)	Ztri _a (Ω)	Ztri _b (Ω)	Ztri _c (Ω)
4,00E-05	0,95	1	1.803	XXX	XXX	XXX
R _A (Ω)	R _B (Ω)	R _C (Ω)	Za _Y (Ω)	Zb _Y (Ω)	Zc _Y (Ω)	V _{Rede} (V)
XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	220 ∠0°



(a)



(b)

Figura 3.12 – (a) Tensões nos terminais do gerador (V), (b) valores relativos às correntes na carga, no capacitor, no gerador e da rede (A).

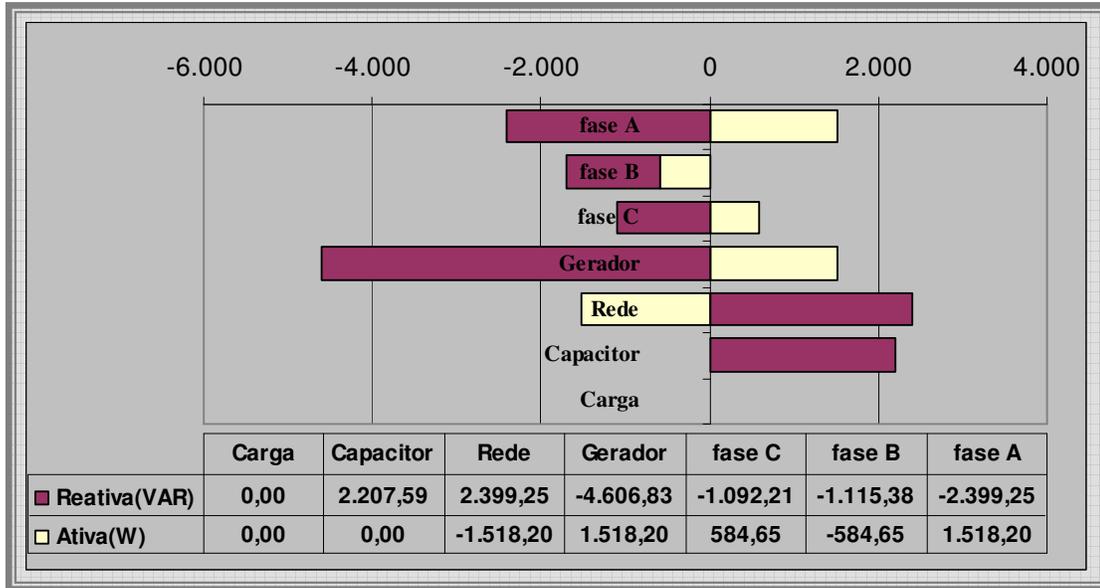


Figura 3.13 – Balanço entre as potências do gerador, rede, carga e capacitor

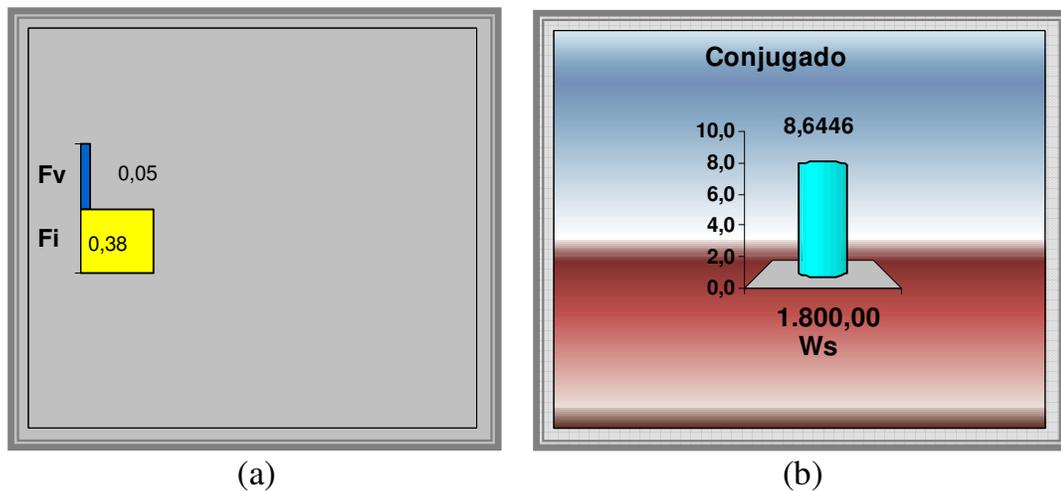
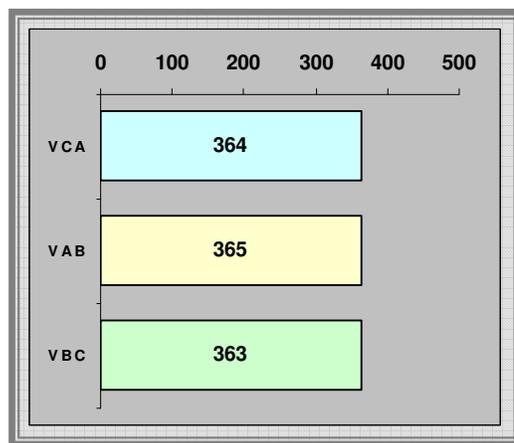


Figura 3.14 – (a) Fator de desbalanceamento de tensão e de corrente, (b) conjugado eletromagnético (N.m) e valor da velocidade síncrona (rpm)

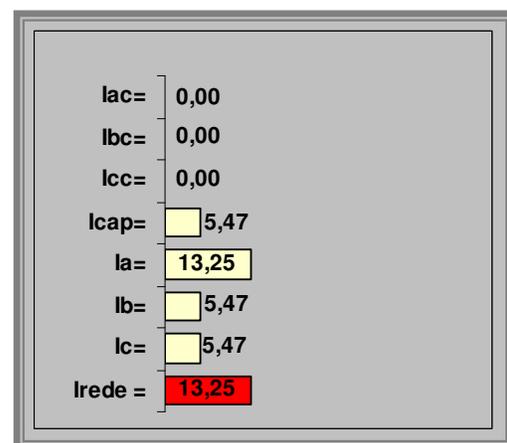
❖ 3ª Combinação: Para a tensão da rede de 220 volts, o gerador em vazio e os dados da tabela 3.15, obtém-se as tensões e correntes, potências, fator de desbalanceamento e conjugado, no sistema; ilustrados respectivamente nas figuras 3.15, 3.16 e 3.17. Em relação à combinação anterior, foram alterados os valores de **b** e **c** conseguindo-se um fator de desbalanceamento praticamente nulo; conforme pode ser observado na figura 3.15.a, pelos valores das tensões.

TABELA 3.15 – DADOS

Cap (F)	b	c	Wr (rpm)	Ztri _a (Ω)	Ztri _b (Ω)	Ztri _c (Ω)
4,00E-05	0,91	1,12	1.803	XXX	XXX	XXX
R _A (Ω)	R _B (Ω)	R _C (Ω)	Za _Y (Ω)	Zb _Y (Ω)	Zc _Y (Ω)	V _{Rede} (V)
XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	220 ∠0°



(a)



(b)

Figura 3.15 – (a) Tensões nos terminais do gerador (V), (b) valores relativos às correntes na carga, no capacitor, no gerador e da rede (A).

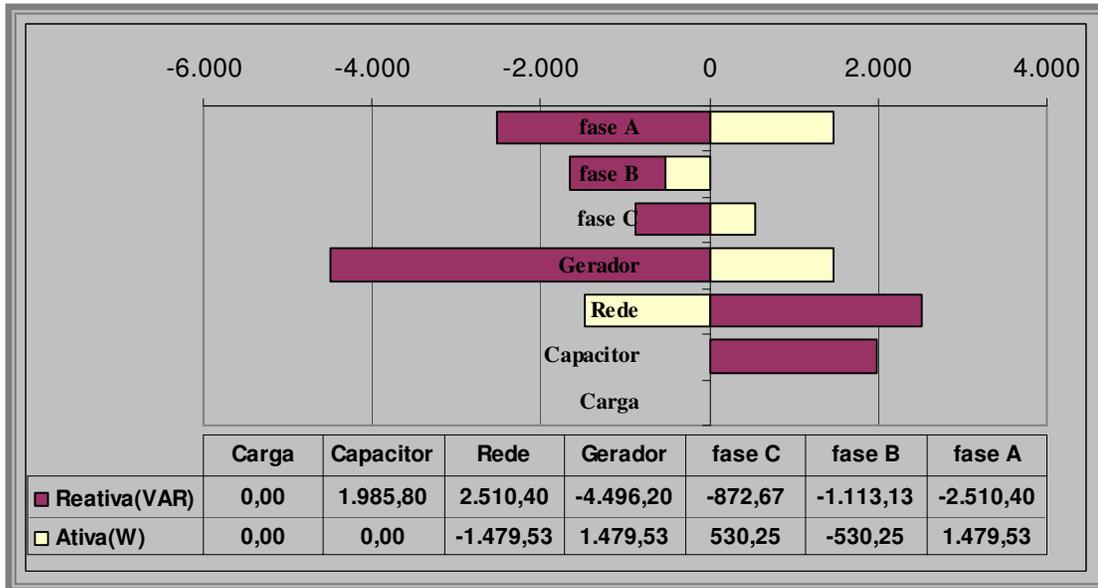


Figura 3.16 – Balanço entre as potências do gerador, rede, carga e capacitor

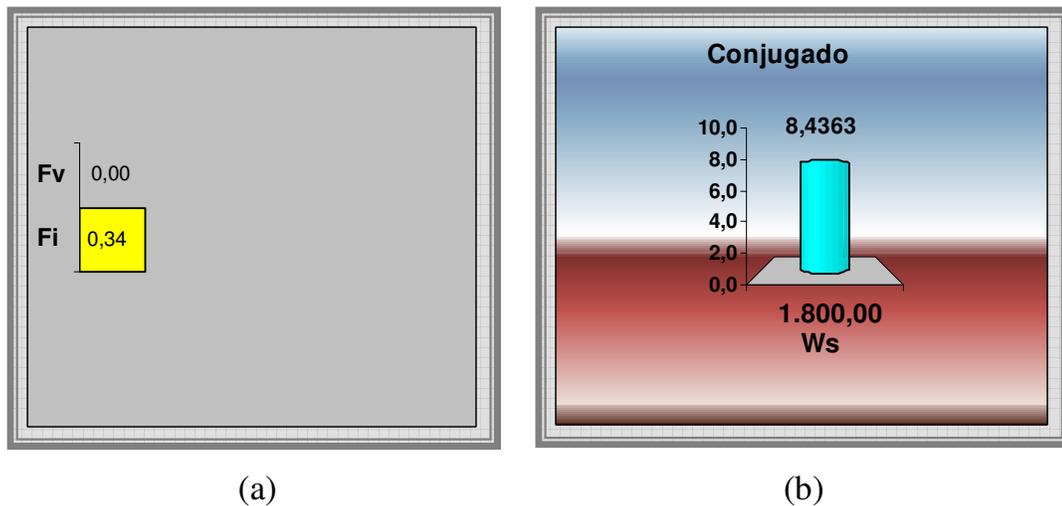


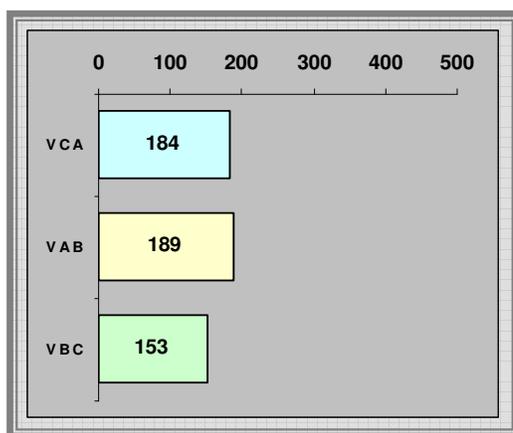
Figura 3.17 – (a) Fator de desbalanceamento de tensão e de corrente, (b) conjugado eletromagnético (N.m) e valor da velocidade síncrona (rpm)

3.5.2.2 – Simulação do gerador de indução trifásico assimétrico tendo como carga lâmpadas de vapor de sódio.

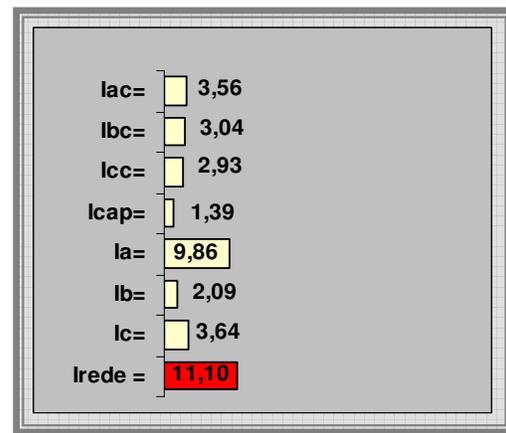
Três lâmpadas de vapor de sódio iguais são ensaiadas e posteriormente ligadas em delta. Para a tensão nominal de 220V, obtém-se: Potência = 480W e Corrente = 2,3A. Como $Z_{\Delta} = 95,65e^{j18^{\circ}}$ é a impedância por fase na configuração delta e Z_{tri} na configuração estrela, tem-se que $Z_{tri} = Z_{\Delta} / 3 = 31,88e^{j18^{\circ}}$.

❖ 1ª Combinação: Para a tensão da rede monofásica de 122 volts, o gerador com carga e os dados da tabela 3.16, obtém-se as figuras 3.18, 3.19 e 3.20.

Cap (F)	b	c	Wr (rpm)	Ztri _a (Ω)	Ztri _b (Ω)	Ztri _c (Ω)
2,41E-05	0,95	1	1.806	31,88 ∠18 ⁰	31,88 ∠18 ⁰	31,88 ∠18 ⁰
R _A (Ω)	R _B (Ω)	R _C (Ω)	Za _Y (Ω)	Zb _Y (Ω)	Zc _Y (Ω)	V _{Rede} (V)
XXX	XXX	XXX	31,88 ∠18 ⁰	31,88 ∠18 ⁰	31,88 ∠18 ⁰	122 ∠0 ⁰



(a)



(b)

Figura 3.18 – (a) Tensões nos terminais do gerador (V), (b) valores relativos às correntes na carga, no capacitor, no gerador e da rede (A).

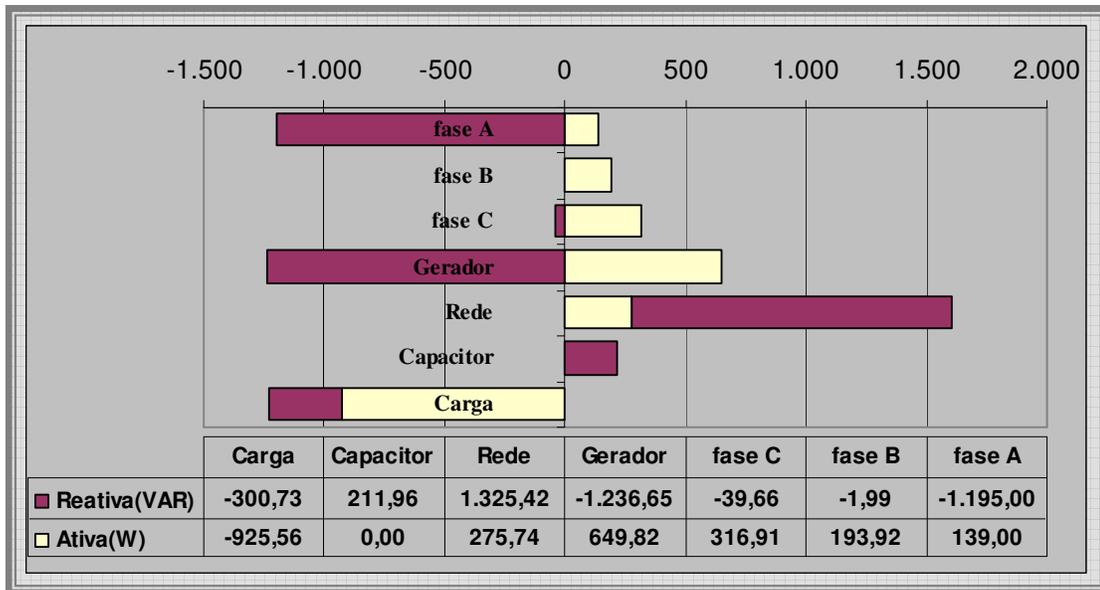


Figura 3.19 – Balanço entre as potências do gerador, rede, carga e capacitor

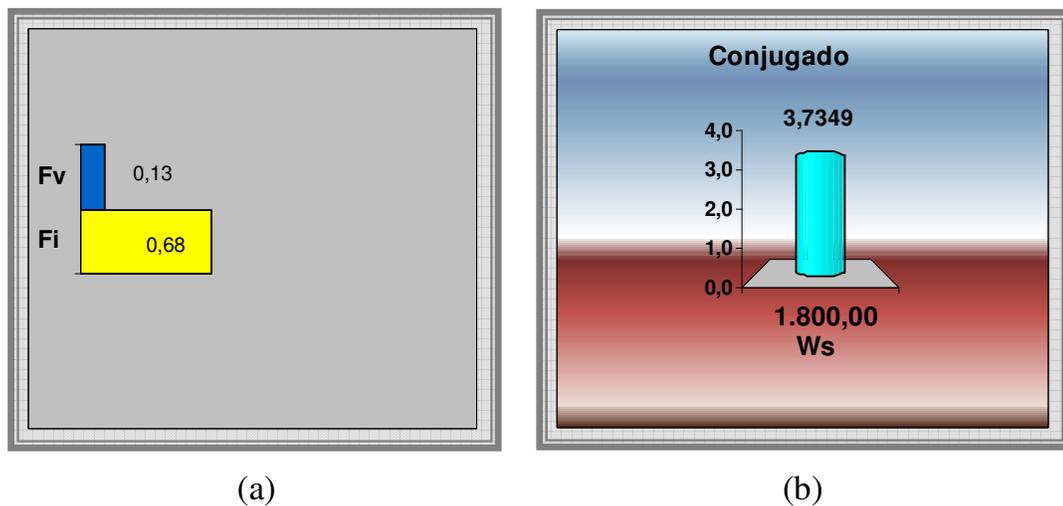
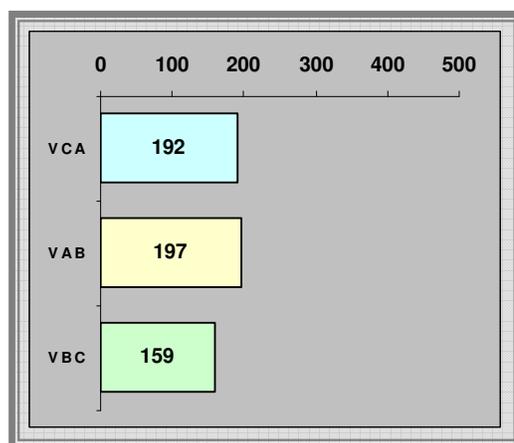


Figura 3.20 – (a) Fator de desbalanceamento de tensão e de corrente, (b) conjugado eletromagnético (N.m) e valor da velocidade síncrona (rpm)

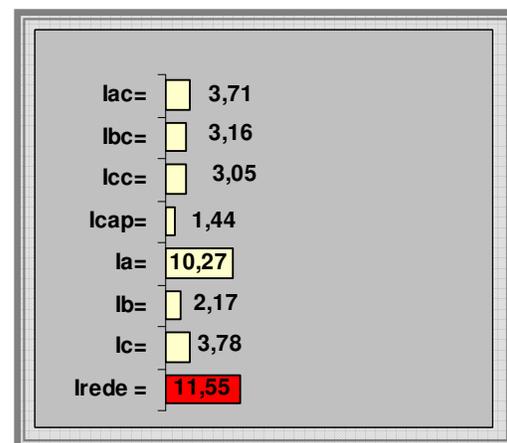
❖ 2ª Combinação: Para a tensão da rede de 127 volts, o gerador com carga e os dados da tabela 3.17, obtém-se as figuras 3.21, 3.22 e 3.23. Em relação à combinação anterior, foi alterada somente a tensão da rede monofásica. Apesar do aumento das tensões nos terminais do gerador, o fator de desbalanceamento permaneceu o mesmo; conforme pode ser observado comparando respectivamente a figura 3.21.a com a figura 3.18.a e a figura 3.20.a com a figura 3.23.a.

TABELA 3.17 – DADOS

Cap (F)	b	c	Wr (rpm)	Ztri _a (Ω)	Ztri _b (Ω)	Ztri _c (Ω)
2,41E-05	0,95	1	1.806	31,88 ∠18 ⁰	31,88 ∠18 ⁰	31,88 ∠18 ⁰
R _A (Ω)	R _B (Ω)	R _C (Ω)	Za _Y (Ω)	Zb _Y (Ω)	Zc _Y (Ω)	V _{Rede} (V)
XXX	XXX	XXX	31,88 ∠18 ⁰	31,88 ∠18 ⁰	31,88 ∠18 ⁰	127 ∠0 ⁰



(a)



(b)

Figura 3.21 – (a) Tensões nos terminais do gerador (V), (b) valores relativos às correntes na carga, no capacitor, no gerador e da rede (A).

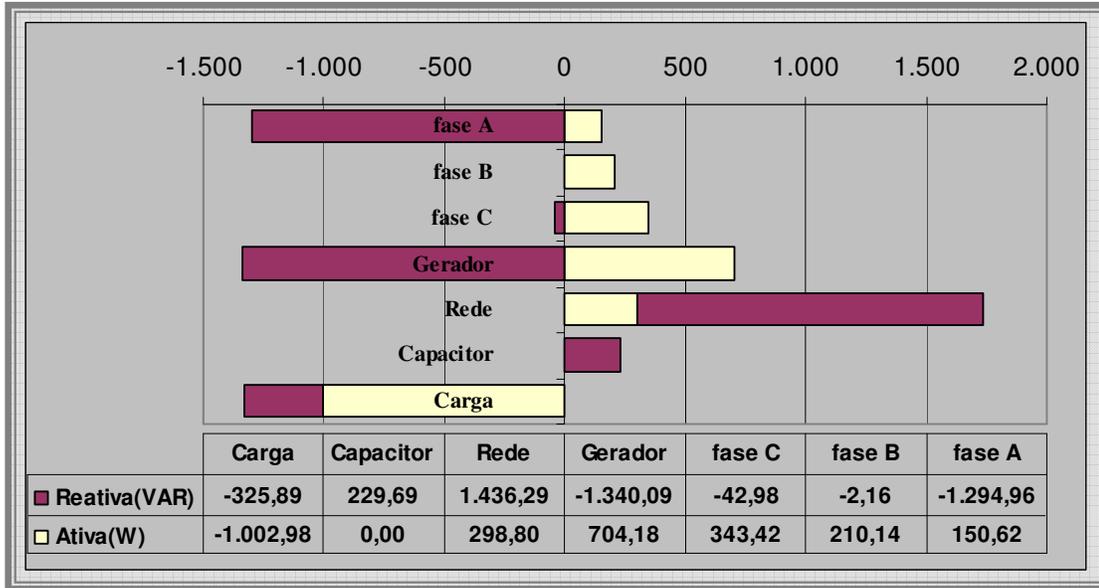


Figura 3.22 – Balanço entre as potências do gerador, rede, carga e capacitor

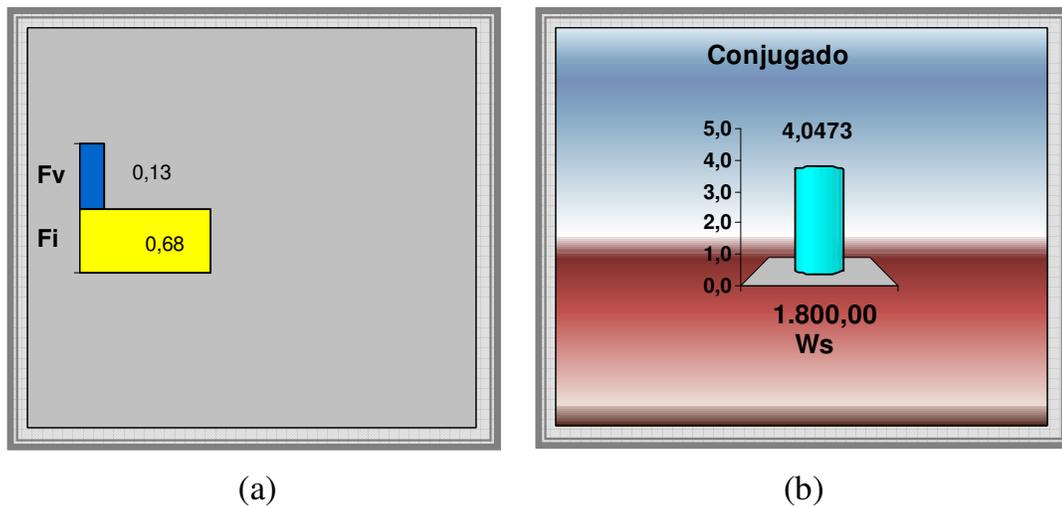
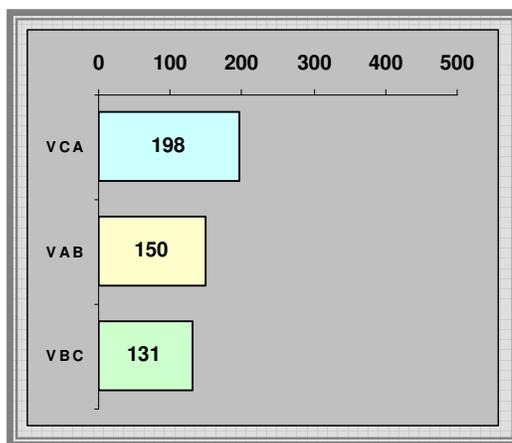


Figura 3.23 – (a) Fator de desbalanceamento de tensão e de corrente, (b) conjugado eletromagnético (N.m) e valor da velocidade síncrona (rpm)

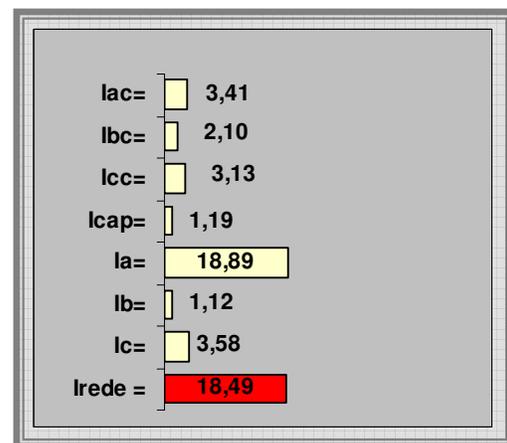
❖ 3ª Combinação: Para a tensão da rede de 122 volts, o gerador com carga e os dados da tabela 3.18, obtém-se as figuras 3.24, 3.25 e 3.26. Neste caso, alterando o valor de W_r em relação à primeira combinação do gerador com carga, tabela 3.16, ocorreu um aumento no fator de desbalanceamento; conforme pode ser observado comparando a figura 3.26.a com a figura 3.20.a.

TABELA 3.18 – DADOS

Cap (F)	b	c	W_r (rpm)	Z_{tri_a} (Ω)	Z_{tri_b} (Ω)	Z_{tri_c} (Ω)
2,41E-05	0,95	1	1.818	$31,88 \angle 18^0$	$31,88 \angle 18^0$	$31,88 \angle 18^0$
R_A (Ω)	R_B (Ω)	R_C (Ω)	Z_{a_Y} (Ω)	Z_{b_Y} (Ω)	Z_{c_Y} (Ω)	V_{Rede} (V)
XXX	XXX	XXX	$31,88 \angle 18^0$	$31,88 \angle 18^0$	$31,88 \angle 18^0$	$122 \angle 0^0$



(a)



(b)

Figura 3.24 – (a) Tensões nos terminais do gerador (V), (b) valores relativos às correntes na carga, no capacitor, no gerador e da rede (A).

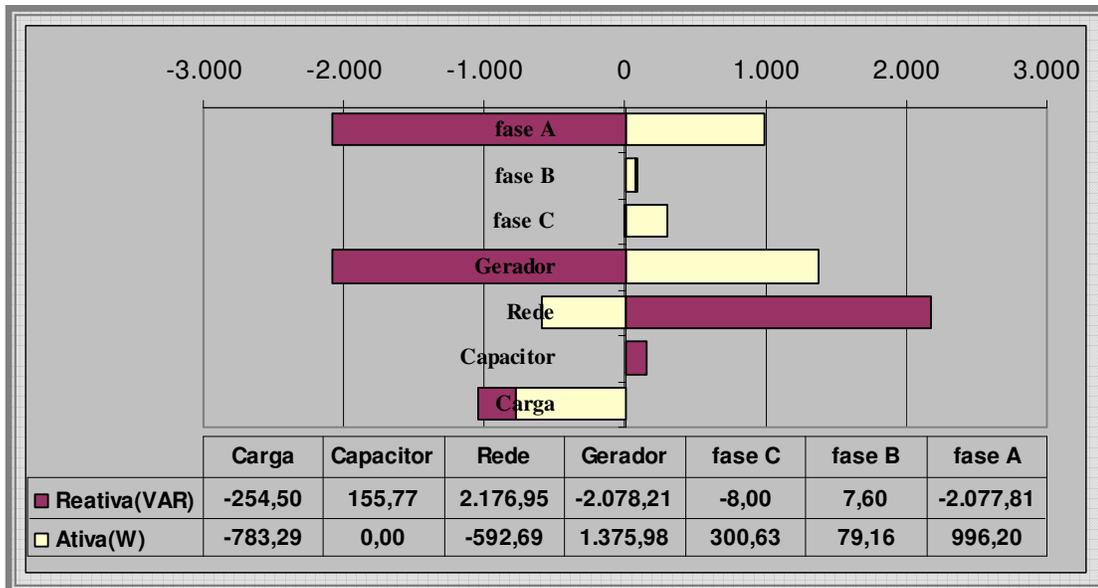


Figura 3.25 – Balanço entre as potências do gerador, rede, carga e capacitor

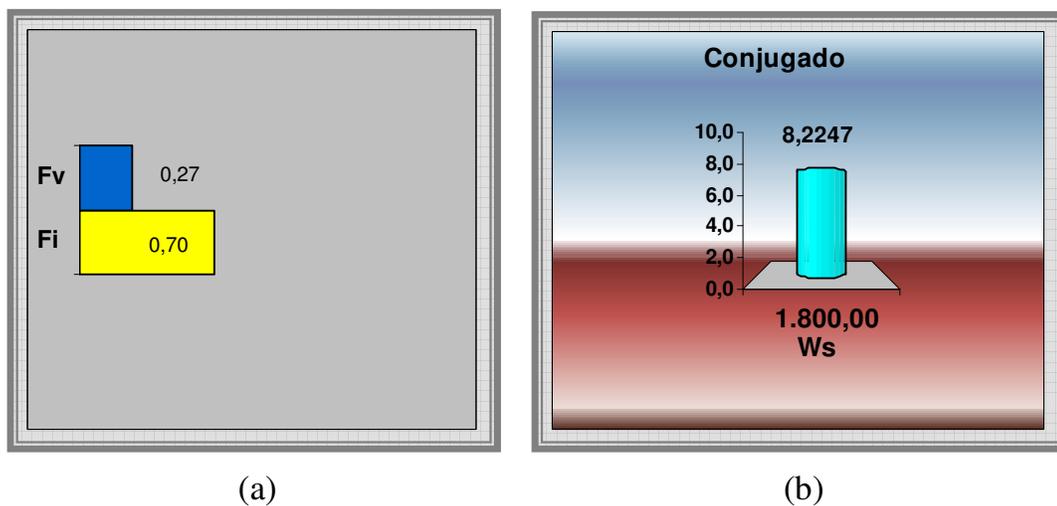
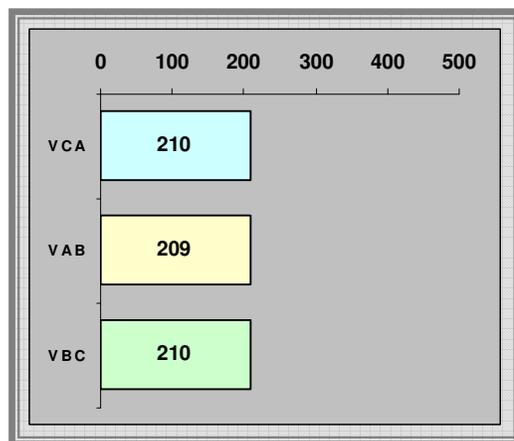


Figura 3.26 – (a) Fator de desbalanceamento de tensão e de corrente, (b) conjugado eletromagnético (N.m) e valor da velocidade síncrona (rpm)

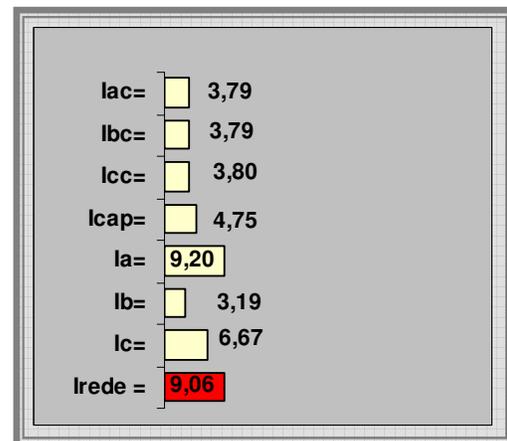
❖ 4ª Combinação: Para a tensão da rede de 127 volts, o gerador com carga e os dados da tabela 3.19, obtém-se as figuras 3.27, 3.28 e 3.29. Neste caso, para os dados da tabela 3.19 obteve-se uma condição ótima de projeto, pois o fator de desbalanceamento resultou nulo, implicando em tensões balanceadas alimentando a carga; conforme figura 3.27.a.

TABELA 3.19 – DADOS

Cap (F)	b	c	Wr (rpm)	Ztri _a (Ω)	Ztri _b (Ω)	Ztri _c (Ω)
6,00E-05	0,95	1	1.809	31,88 ∠18 ⁰	31,88 ∠18 ⁰	31,88 ∠18 ⁰
R _A (Ω)	R _B (Ω)	R _C (Ω)	Za _Y (Ω)	Zb _Y (Ω)	Zc _Y (Ω)	V _{Rede} (V)
XXX	XXX	XXX	31,88 ∠18 ⁰	31,88 ∠18 ⁰	31,88 ∠18 ⁰	127 ∠0 ⁰



(a)



(b)

Figura 3.27 – (a) Tensões nos terminais do gerador (V), (b) valores relativos às correntes na carga, no capacitor, no gerador e da rede (A).

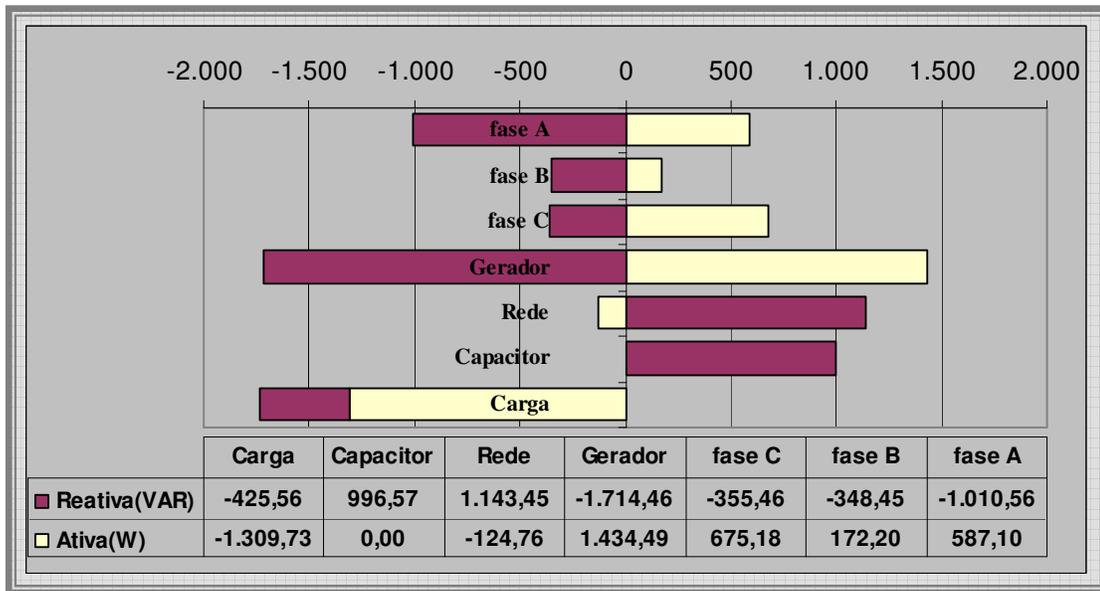


Figura 3.28 – Balanço entre as potências do gerador, rede, carga e capacitor

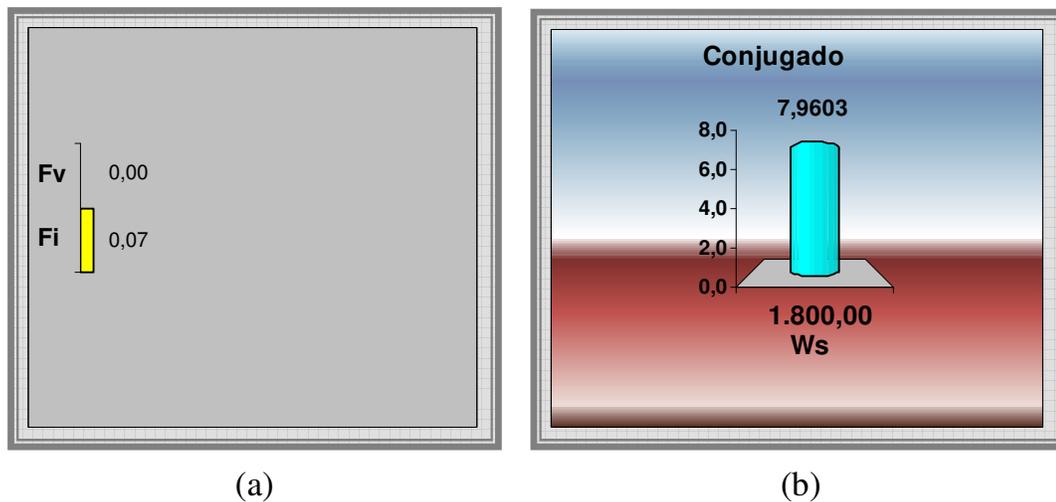
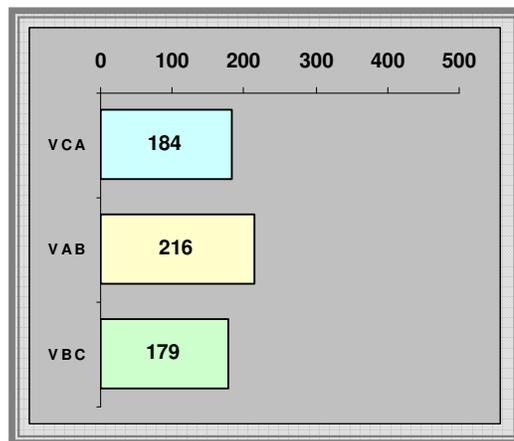


Figura 3.29 – (a) Fator de desbalanceamento de tensão e de corrente, (b) conjugado eletromagnético (N.m) e valor da velocidade síncrona (rpm)

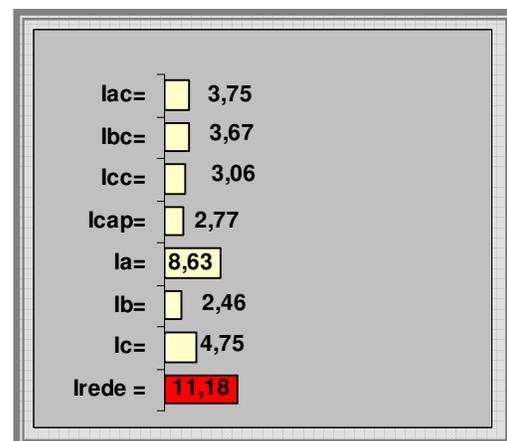
❖ 5ª Combinação: Para a tensão da rede de 127 volts, o gerador com carga e os dados da tabela 3.20, obtém-se as figuras 3.30, 3.31 e 3.32. Neste caso, alterando o valor de Wr e do capacitor em relação à combinação anterior, obtém-se um aumento no fator de desbalanceamento.

TABELA 3.20 – DADOS

Cap (F)	b	c	Wr (rpm)	Ztri _a (Ω)	Ztri _b (Ω)	Ztri _c (Ω)
4,10E-05	0,95	1	1.803	31,88 ∠18 ⁰	31,88 ∠18 ⁰	31,88 ∠18 ⁰
R _A (Ω)	R _B (Ω)	R _C (Ω)	Za _Y (Ω)	Zb _Y (Ω)	Zc _Y (Ω)	V _{Rede} (V)
XXX	XXX	XXX	31,88 ∠18 ⁰	31,88 ∠18 ⁰	31,88 ∠18 ⁰	127 ∠0 ⁰



(a)



(b)

Figura 3.30 – (a) Tensões nos terminais do gerador (V), (b) valores relativos às correntes na carga, no capacitor, no gerador e da rede (A).

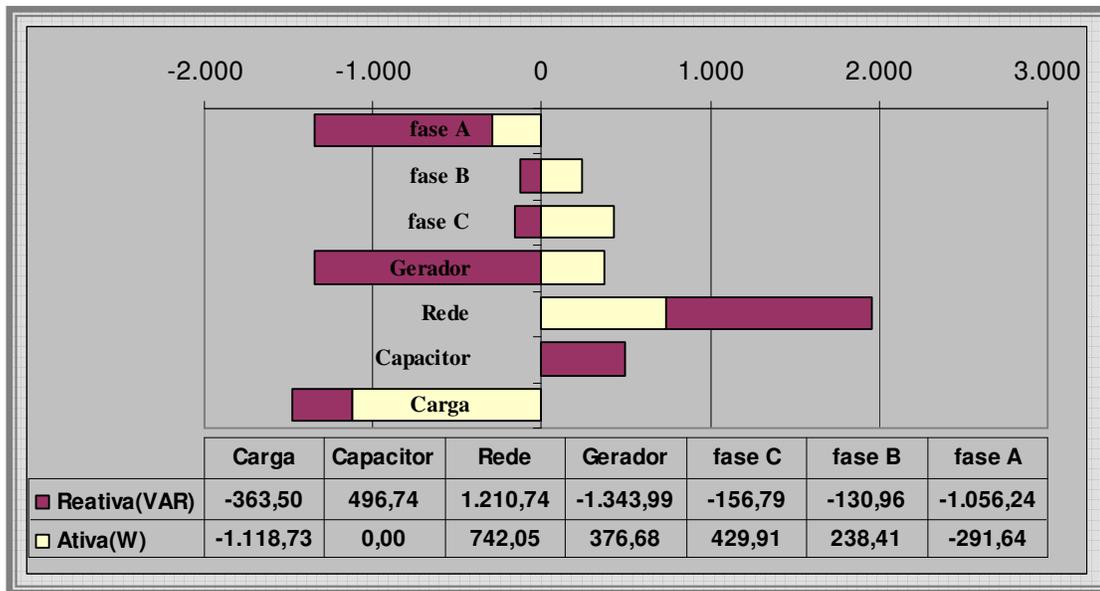


Figura 3.31 – Balanço entre as potências do gerador, rede, carga e capacitor

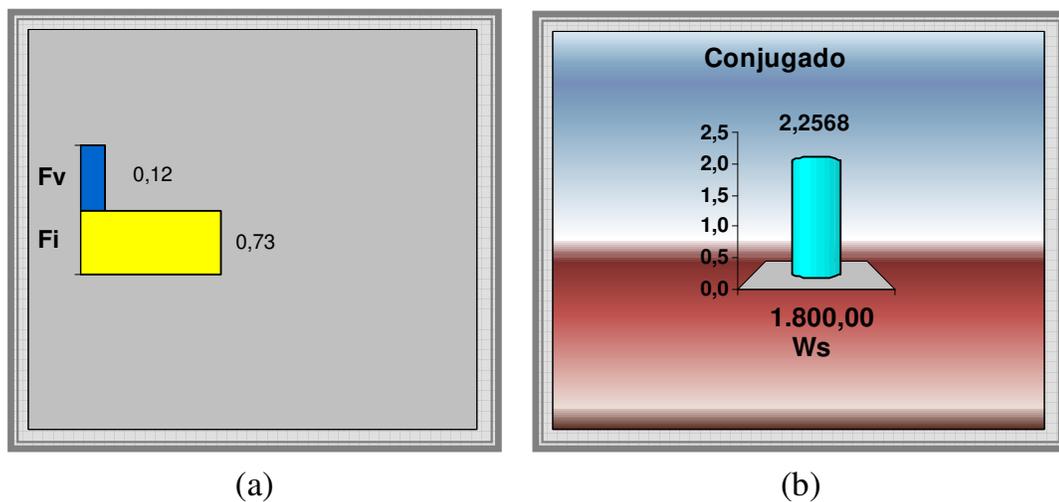


Figura 3.32 – (a) Fator de desbalanceamento de tensão e de corrente, (b) conjugado eletromagnético (N.m) e valor da velocidade síncrona (rpm)

❖ 6ª Combinação:

Nesta combinação, serão apresentadas várias simulações para a carga trifásica em questão (lâmpadas de vapor de sódio) em paralelo com uma carga resistiva monofásica ou bifásica de acoplamento. A impedância da carga de acoplamento (R_A , R_B ou R_C) usada nas simulações é compatível com a de um chuveiro elétrico de 220V – 4.500W ou com a de lâmpadas incandescentes de 220V – 150W (cada lâmpada).

Como a carga trifásica foi ligada em delta, a carga de acoplamento é bifásica e Z_{aY} , Z_{bY} e Z_{cY} , nas tabelas de dados desde a tabela 3.21 até a tabela 3.29, representam as impedâncias resultantes das relações de conversão triângulo-estrela de impedâncias do paralelo entre a carga trifásica ($Z_{\Delta fase} = 95,65e^{j18^\circ}$) com a carga de acoplamento (R_A , R_B ou R_C), conforme ilustra a figura 2.8 do capítulo anterior. As impedâncias $Z_{tri(a,b,c)}$ continuam representando as impedâncias, por fase, da carga trifásica equilibrada ligada em estrela.

Para que se pudesse efetuar comparações entre as situações de existência e não existência de cargas de acoplamento, os parâmetros utilizados como referência são os dados pela tabela 3.16; isto é, nas simulações apresentadas a seguir os respectivos valores de capacitor (**Cap**), **b**, **c**, **Wr** e **tensão da rede** são os apresentados na tabela 3.16. Da mesma forma o fator de desbalanceamento tomado como referência, caso que não contempla a carga de acoplamento e está associado aos parâmetros da tabela 3.16, é o apresentado na figura 3.20.a.

- a) R_A (uma lâmpada incandescente) // $Z_{\Delta fase AB}$

Observa-se neste caso, comparando a figura 3.33.c com a referência dada pela figura 3.20.a, que não houve melhora no fator de desbalanceamento.

TABELA 3.21 – DADOS						
Cap (F)	b	c	Wr (rpm)	Ztri _a (Ω)	Ztri _b (Ω)	Ztri _c (Ω)
2,41E-05	0,95	1	1.806	31,88∠18 ⁰	31,88∠18 ⁰	31,88∠18 ⁰
R _A (Ω)	R _B (Ω)	R _C (Ω)	Za _Y (Ω)	Zb _Y (Ω)	Zc _Y (Ω)	V _{Rede} (V)
322,66	XX	XX	26,80∠15 ⁰	26,80∠15 ⁰	34,45∠19 ⁰	122∠0 ⁰

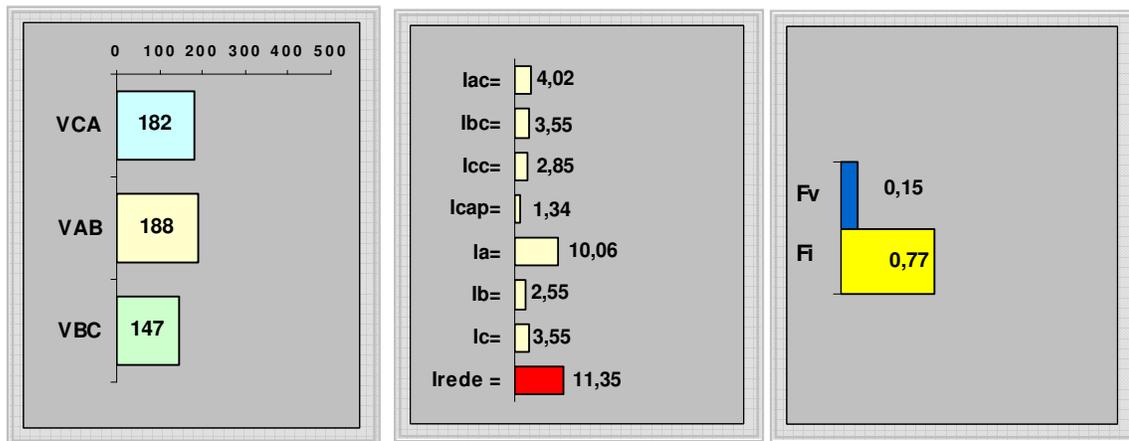


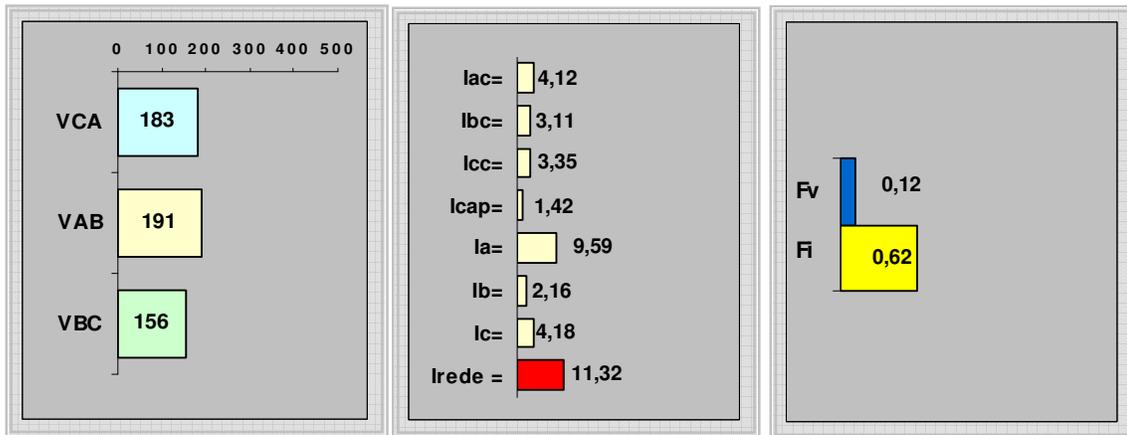
Figura 3.33 – (a) Tensões nos terminais do gerador (V), (b) valores relativos às correntes na carga, no capacitor, no gerador e da rede (A) e (c) Fator de desbalanceamento de tensão e de corrente.

- b) R_B (uma lâmpada incandescente) // $Z_{\Delta fase AC}$

Dentre os casos simulados onde a carga de acoplamento é uma única lâmpada incandescente, este caso apresenta melhoria no fator de desbalanceamento; conforme pode ser observado comparando a figura 3.34.c com a referência dada pela figura 3.20.a.

TABELA 3.22 – DADOS

Cap (F)	b	c	Wr (rpm)	Ztri _a (Ω)	Ztri _b (Ω)	Ztri _c (Ω)
2,41E-05	0,95	1	1.806	31,88∠18 ⁰	31,88∠18 ⁰	31,88∠18 ⁰
R _A (Ω)	R _B (Ω)	R _C (Ω)	Za _Y (Ω)	Zb _Y (Ω)	Zc _Y (Ω)	V _{Rede} (V)
XX	322,66	X	26,80∠15 ⁰	34,45∠19 ⁰	26,80∠15 ⁰	122∠0 ⁰



(a)

(b)

(c)

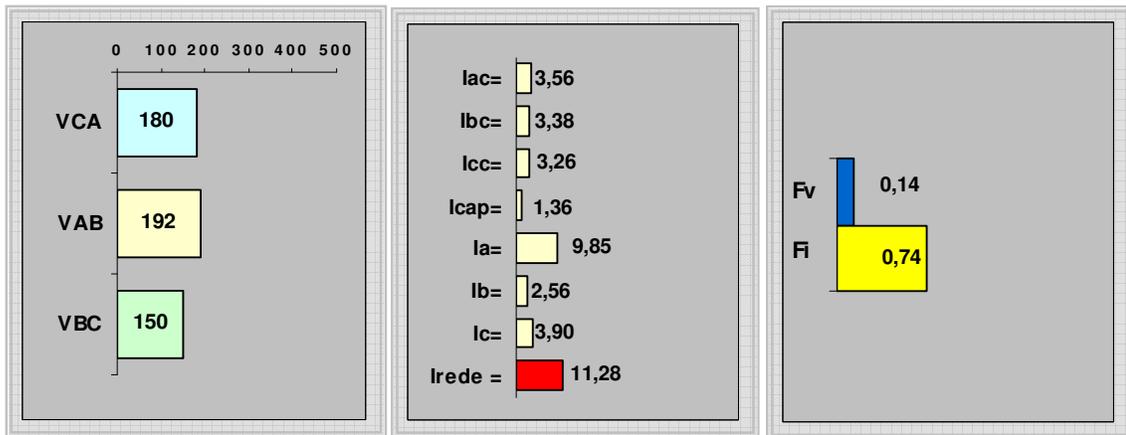
Figura 3.34 – (a) Tensões nos terminais do gerador (V), (b) valores relativos às correntes na carga, no capacitor, no gerador e da rede (A) e (c) Fator de desbalanceamento de tensão e de corrente.

- c) R_C (uma lâmpada incandescente) // $Z_{\Delta fase BC}$

Observa-se neste caso, comparando a figura 3.35.c com a referência dada pela figura 3.20.a, que não houve melhora no fator de desbalanceamento.

TABELA 3.23 – DADOS

Cap (F)	b	c	Wr (rpm)	Ztri _a (Ω)	Ztri _b (Ω)	Ztri _c (Ω)
2,41E-05	0,95	1	1.806	31,88∠18 ⁰	31,88∠18 ⁰	31,88∠18 ⁰
R _A (Ω)	R _B (Ω)	R _C (Ω)	Z _{aY} (Ω)	Z _{bY} (Ω)	Z _{cY} (Ω)	V _{Rede} (V)
XX	XX	322,66	34,45∠19 ⁰	26,80∠15 ⁰	26,80∠15 ⁰	122∠0 ⁰



(a)

(b)

(c)

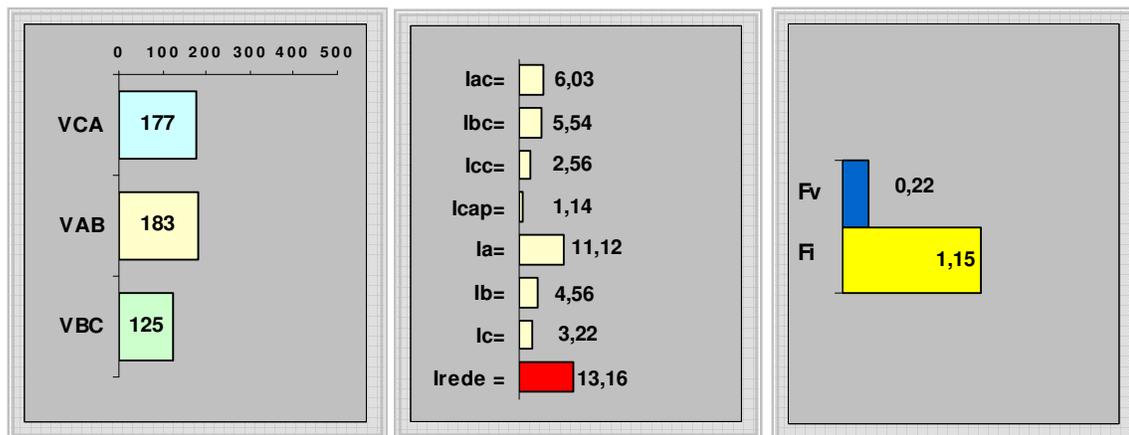
Figura 3.35 – (a) Tensões nos terminais do gerador (V), (b) valores relativos às correntes na carga, no capacitor, no gerador e da rede (A) e (c) Fator de desbalanceamento de tensão e de corrente.

- d) R_A (cinco lâmpadas incandescentes) // $Z_{\Delta fase AB}$

Observa-se neste caso, comparando a figura 3.36.c com a referência dada pela figura 3.20.a, que não houve melhora no fator de desbalanceamento.

TABELA 3.24 – DADOS

Cap (F)	b	c	Wr (rpm)	Ztri _a (Ω)	Ztri _b (Ω)	Ztri _c (Ω)
2,41E-05	0,95	1	1.806	31,88∠18 ⁰	31,88∠18 ⁰	31,88∠18 ⁰
R _A (Ω)	R _B (Ω)	R _C (Ω)	Za _Y (Ω)	Zb _Y (Ω)	Zc _Y (Ω)	V _{Rede} (V)
64,53	XX	XX	16,24∠9,1 ⁰	16,24∠9,1 ⁰	39,83∠20 ⁰	122∠0 ⁰



(a)

(b)

(c)

Figura 3.36 – (a) Tensões nos terminais do gerador (V), (b) valores relativos às correntes na carga, no capacitor, no gerador e da rede (A) e (c) Fator de desbalanceamento de tensão e de corrente.

- e) R_B (cinco lâmpadas incandescentes) // $Z_{\Delta fase AC}$

Dentre os casos simulados onde a carga de acoplamento é formada por cinco lâmpadas incandescentes, este caso apresenta melhoria no fator de desbalanceamento; conforme pode ser observado comparando a figura 3.37.c com a referência dada pela figura 3.20.a.

TABELA 3.25 – DADOS

Cap (F)	b	c	Wr (rpm)	Ztri _a (Ω)	Ztri _b (Ω)	Ztri _c (Ω)
2,41E-05	0,95	1	1.806	31,88∠18 ⁰	31,88∠18 ⁰	31,88∠18 ⁰
R _A (Ω)	R _B (Ω)	R _C (Ω)	Za _Y (Ω)	Zb _Y (Ω)	Zc _Y (Ω)	V _{Rede} (V)
XX	64,53	XX	16,24∠9,1 ⁰	39,83∠20 ⁰	16,24∠9,1 ⁰	122∠0 ⁰

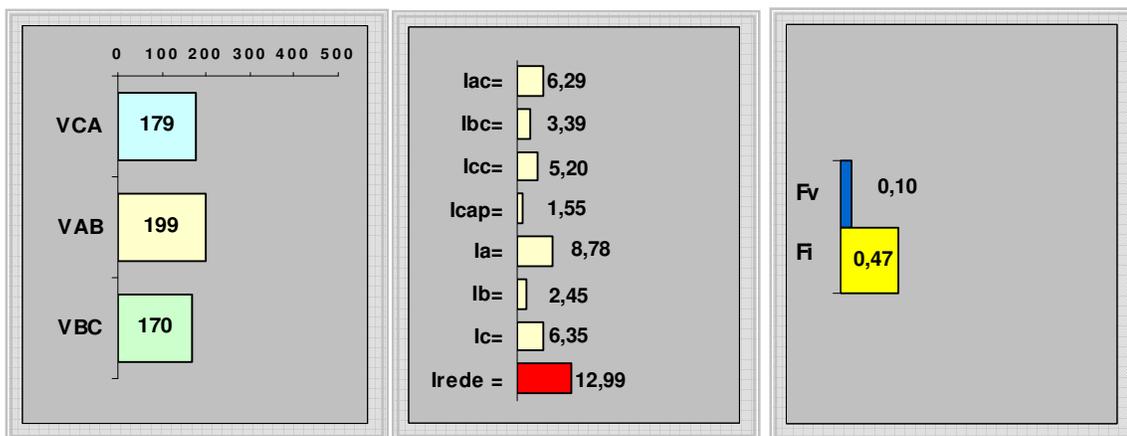
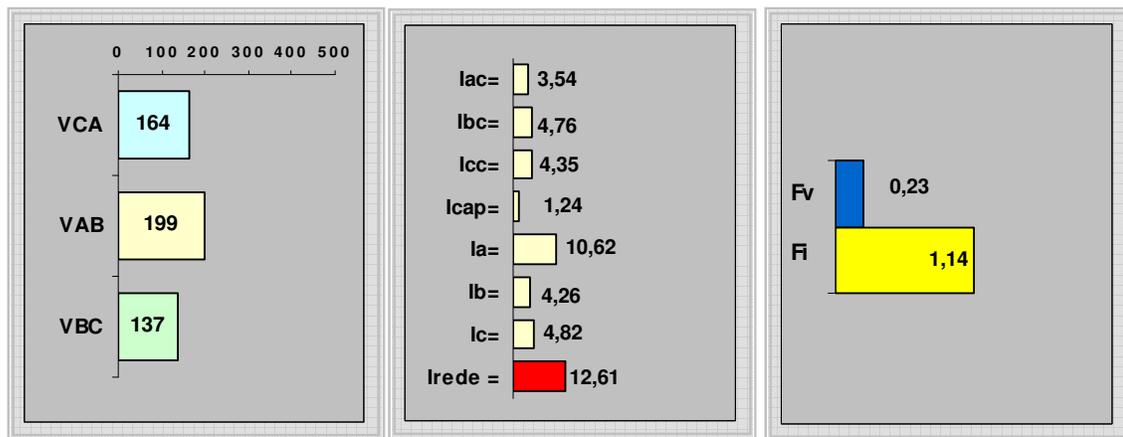


Figura 3.37 – (a) Tensões nos terminais do gerador (V), (b) valores relativos às correntes na carga, no capacitor, no gerador e da rede (A) e (c) Fator de desbalanceamento de tensão e de corrente.

- f) R_C (cinco lâmpadas incandescentes) // $Z_{\Delta fase BC}$

Observa-se neste caso, comparando a figura 3.38.c com a referência dada pela figura 3.20.a, que não houve melhora no fator de desbalanceamento.

Cap (F)	b	c	W_r (rpm)	Z_{tri_a} (Ω)	Z_{tri_b} (Ω)	Z_{tri_c} (Ω)
2,41E-05	0,95	1	1.806	$31,88 \angle 18^0$	$31,88 \angle 18^0$	$31,88 \angle 18^0$
R_A (Ω)	R_B (Ω)	R_C (Ω)	Z_{aY} (Ω)	Z_{bY} (Ω)	Z_{cY} (Ω)	V_{Rede} (V)
XX	XX	64,53	$39,83 \angle 20^0$	$16,24 \angle 9,1^0$	$16,24 \angle 9,1^0$	$122 \angle 0^0$



(a)

(b)

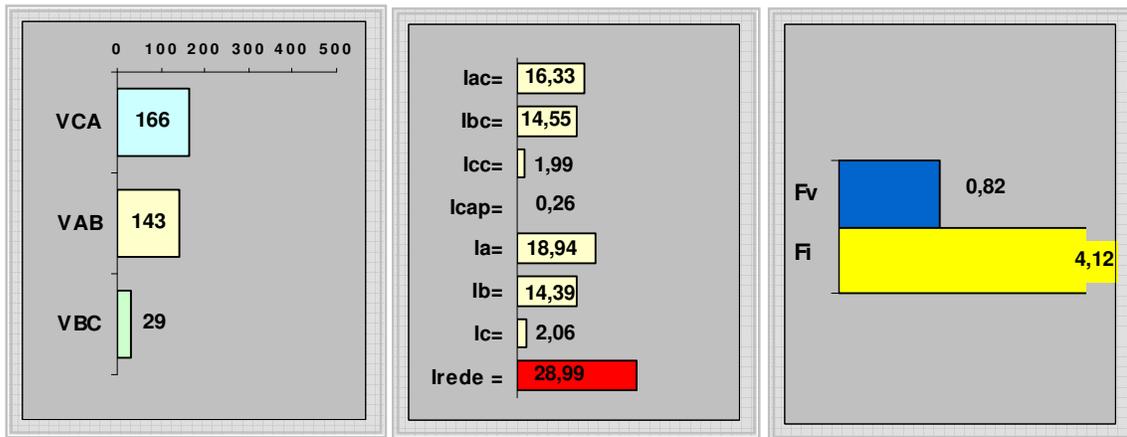
(c)

Figura 3.38 – (a) Tensões nos terminais do gerador (V), (b) valores relativos às correntes na carga, no capacitor, no gerador e da rede (A) e (c) Fator de desbalanceamento de tensão e de corrente.

- g) R_A (chuveiro) // $Z_{\Delta faseAB}$

Observa-se neste caso, comparando a figura 3.39.c com a referência dada pela figura 3.20.a, que não houve melhora no fator de desbalanceamento.

Cap (F)	b	c	W_r (rpm)	Z_{tri_a} (Ω)	Z_{tri_b} (Ω)	Z_{tri_c} (Ω)
2,41E-05	0,95	1	1.806	$31,88 \angle 18^0$	$31,88 \angle 18^0$	$31,88 \angle 18^0$
R_A (Ω)	R_B (Ω)	R_C (Ω)	Z_{aY} (Ω)	Z_{bY} (Ω)	Z_{cY} (Ω)	V_{Rede} (V)
10,76	XX	XX	$4,63 \angle 2,6^0$	$4,63 \angle 2,6^0$	$45,6 \angle 18,8^0$	$122 \angle 0^0$



(a)

(b)

(c)

Figura 3.39 – (a) Tensões nos terminais do gerador (V), (b) valores relativos às correntes na carga, no capacitor, no gerador e da rede (A) e (c) Fator de desbalanceamento de tensão e de corrente.

- h) R_B (chuveiro) // $Z_{\Delta fase AC}$

Observa-se neste caso, comparando a figura 3.40.c com a referência dada pela figura 3.20.a, que não houve melhora no fator de desbalanceamento.

TABELA 3.28 – DADOS						
Cap (F)	b	c	W_r (rpm)	Z_{tri_a} (Ω)	Z_{tri_b} (Ω)	Z_{tri_c} (Ω)
2,41E-05	0,95	1	1.806	$31,88 \angle 18^0$	$31,88 \angle 18^0$	$31,88 \angle 18^0$
R_A (Ω)	R_B (Ω)	R_C (Ω)	Z_{a_Y} (Ω)	Z_{b_Y} (Ω)	Z_{c_Y} (Ω)	V_{Rede} (V)
XX	10,76	XX	$4,63 \angle 2,6^0$	$45,6 \angle 18,8^0$	$4,63 \angle 2,6^0$	$122 \angle 0^0$

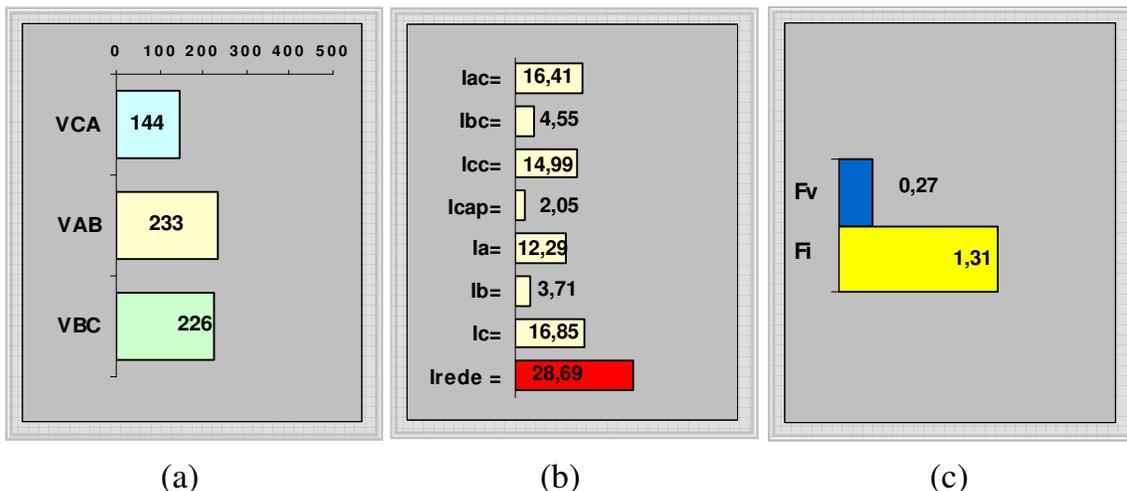
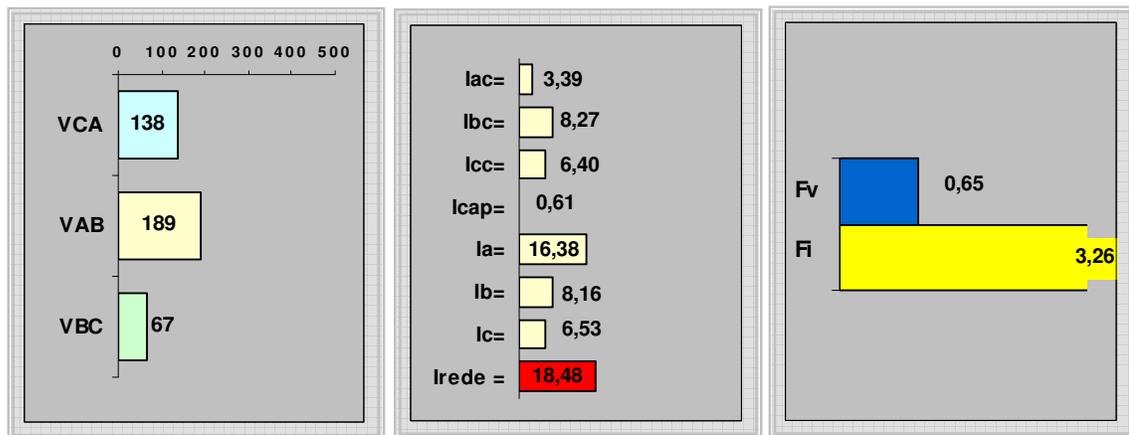


Figura 3.40 – (a) Tensões nos terminais do gerador (V), (b) valores relativos às correntes na carga, no capacitor, no gerador e da rede (A) e (c) Fator de desbalanceamento de tensão e de corrente.

- i) R_C (chuveiro) // $Z_{\Delta\text{faseBC}}$

Observa-se neste caso, comparando a figura 3.41.c com a referência dada pela figura 3.20.a, que não houve melhora no fator de desbalanceamento.

Cap (F)	b	c	W_r (rpm)	Z_{tri_a} (Ω)	Z_{tri_b} (Ω)	Z_{tri_c} (Ω)
2,41E-05	0,95	1	1.806	$31,88\angle 18^0$	$31,88\angle 18^0$	$31,88\angle 18^0$
R_A (Ω)	R_B (Ω)	R_C (Ω)	Z_{aY} (Ω)	Z_{bY} (Ω)	Z_{cY} (Ω)	V_{Rede} (V)
XX	XX	10,76	$45,6\angle 18,8^0$	$4,63\angle 2,6^0$	$4,63\angle 2,6^0$	$122\angle 0^0$



(a)

(b)

(c)

Figura 3.41 – (a) Tensões nos terminais do gerador (V), (b) valores relativos às correntes na carga, no capacitor, no gerador e da rede (A) e (c) Fator de desbalanceamento de tensão e de corrente.

3.5.2.3 – Construção do protótipo

Como um dos objetivos deste trabalho é validar o modelo matemático desenvolvido, com relação às equações elétricas e mecânicas, escolheu-se situações de simulações que pudessem ser implementadas na prática; buscando alterações nos números das espiras dos enrolamentos que pudessem ser realizadas e buscando valores de capacitores compatíveis com os comerciais.

Objetivando, ainda, escolher uma combinação dos valores de **b**, **c** e **cap** que possibilitasse realizar o maior número possível de ensaios experimentais, optou-se pela combinação **b** = 0,95 e **c** = 1; sendo Cap = 2,41E- 05F para as situações de gerador em vazio (tabela 3.13), gerador alimentando lâmpadas de vapor de sódio (tabela 3.16) e gerador alimentando lâmpadas de vapor de sódio mais carga de acoplamento (tabela 3.25).

Desta forma, será possível a realização dos ensaios experimentais com o gerador assimétrico em vazio e em duas situações de carga; com um fator de desbalanceamento relativamente baixo, sem exceder a corrente nominal do gerador.

Em nenhuma das simulações selecionada se observa sobretensão ou sobrecorrente na carga.

Como no enrolamento original $N_a = N_b = N_c = 68$ espiras, conseqüentemente **b** = **c** = 1. Para se alterar o valor de **b** = N_a / N_b para 0,95 mantendo N_a inalterado, tem-se que:

$$\text{como: } b = \frac{N_a}{N_b} \Rightarrow N_b = \frac{N_a}{0,95} \cong 72 \text{ espiras}$$

Para o gerador assimétrico, se deseja que $c = N_a / N_c = 1$. Portanto não haverá alteração do número de espiras do enrolamento da fase **C**; conservando $N_c = 68$ espiras.

Como o aumento do número de espiras na fase **B** não é tão significativo (5,88% de aumento), não haverá problemas quanto à acomodação do acréscimo de espiras nas ranhuras.

Aumenta-se o número de fiação em paralelo na fase **A** para 6 fios #19 como medida de segurança a qualquer corrente elevada, já que a fase **A** é aquela que recebe a tensão monofásica; pois o enrolamento original é formado por 4 fios #19 ligados em paralelo por fase tendo uma corrente admissível de 7,5A para cada fio #19, sendo que a corrente nominal é de aproximadamente 30 A.

A figura 3.42 ilustra os enrolamentos da máquina assimétrica. Os números entre parêntesis representam os terminais numerados da máquina.

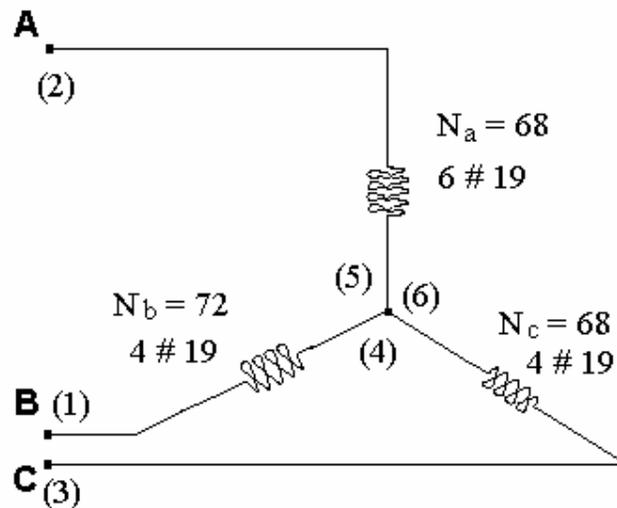


Figura 3.42 – Enrolamento do Gerador Assimétrico

Com relação à corrente de linha da rede, dependerá do sistema monofásico alimentador ser suficientemente forte para fornecer energia. Cabe lembrar que o sistema rural normalmente trabalha na classe $\frac{13,8}{\sqrt{3}}$ Kv ou $\frac{34,5}{\sqrt{3}}$ Kv com cabeamento hoje mínimo de 2AWG – CAA, o que ocasiona pouco impacto na alta. Portanto, o cuidado que se tem de tomar é somente com o transformador rebaixador.

3.6 - Considerações Finais

A partir da aplicação dos valores dos parâmetros, obtidos nos ensaios que foram realizados neste capítulo, nas equações desenvolvidas no capítulo anterior, tomaram-se várias combinações de **b**, **c** e **Cap** levando em consideração duas situações diferentes de carga, para a realização das simulações. Dentre estas combinações selecionaram-se algumas, visando à construção do protótipo do gerador assimétrico; possibilitando, assim, a realização de ensaios experimentais em laboratório e na propriedade rural, e conseqüente validação do modelo matemático apresentado anteriormente, para a situação da máquina assimétrica funcionando como gerador acoplado a um sistema monofásico de alimentação e a uma carga trifásica.

Nas simulações, foram realizadas também variações ou nos valores da carga monofásica ou bifásica de acoplamento (R_A , R_B ou R_C), ou na tensão monofásica da rede, ou na rotação da máquina primária, em determinadas situações, objetivando conseguir menor fator de desbalanceamento

Neste capítulo, foi apresentado e testado um desenvolvimento matemático novo para o cálculo dos parâmetros da máquina de indução trifásica.