UNIVERSIDADE ESTADUAL PALISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

"Educação em engenharia: estudo de metodologias pedagógicas e desenvolvimento de um software aplicado ao ensino de estabilidade de sistemas de energia elétrica"

NILTOM VIEIRA JUNIOR

Orientador: Prof. Dr. Laurence Duarte Colvara.

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia – UNESP - Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.
Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Ilha Solteira – SP

Abril/2007

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP-Ilha Solteira

Vieira Junior, Niltom.
V665e Educação em engenharia: estudo de metodologias pedagógicas e desenvolvimento de um
software aplicado ao ensino de estabilidade de sistemas de energia elétrica / Niltom Vieira Junior.
Ilha Solteira : [s.n.], 2007
xi, 95 p. : il., fots. (algumas color)

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha
Solteira. Área de Conhecimento : Sistemas de Energia Elétrica, 2007

Orientador: Laurence Duarte Colvara
Bibliografia: p. 71 - 74

1. Sistemas de energia elétrica – Estabilidade. 2. Engenharia – Estudo e ensino. 3. Programação orientada a objetos (Computação). 4. Software – Educação.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todo o amor e incentivo dos meus pais, Nilton Vieira e Maria Benedita Santos Vieira, sem os quais nada seria possível, nem mesmo minha existência.

AGRADECIMENTOS

Durante minha permanência no Departamento de Engenharia Elétrica vivenciei o verdadeiro espírito de grupo e é necessário agradecer de forma especial algumas pessoas:

- Professor Laurence Duarte Colvara, por orientar, confiar e acreditar neste trabalho e em mim desde o primeiro momento;
- Professor Sérgio Azevedo de Oliveira, pelo interesse, incentivo e importantes contribuições cedidas ao longo do trabalho;
- Professor Antonio Padilha Feltrin, pelas observações e contribuições dadas no exame de qualificação;
- Jorge Medeiros e Fernando Sanchez (animal), por terem salvo a minha vida em um acidente ocorrido neste período e pela amizade incondicional demonstrada a cada instante;
- Marcelo Fuly Batista, pela grande amizade, presença marcante e disposição em ajudar a qualquer hora;
- Edilton Furquim Goulart Sobrinho, por estar sempre pronto, pela amizade e vários momentos inesquecíveis;
- André Luiz Vieira da Silva, a quem mesmo à distância sou grato pela amizade e importante contribuição para o meu aprendizado em programação;
- Jâine Henrique Canossa, pelo incentivo, colaboração e companheirismo em incessantes e intermináveis dias e noites de trabalho;
- Carlos Alberto Febres Tapia, pela ajuda, dedicação e por estar presente em ocasiões importantes;
- Danilo Hiroshi Konda, pela amizade, apoio e parceria em incontáveis situações; e
- A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica e Seção de Pós-graduação, pelo sorriso e dedicação na qual sempre me receberam.

Ciclos se encerram, amizades se perpetuam.

Muito obrigado a todos.

“*Para ver tivemos que pensar e poderíamos não ter sobre o que pensar se não estivéssemos vendo”*.

Rudolf Arnheim.

RESUMO

Em vista da comum associação do professor com um modelo ou padrão a ser seguido, este trabalho evidencia a importância da figura docente em sala de aula e propõe a partir do estudo da aprendizagem e dos alunos sob diferentes perspectivas, a utilização de instrumentos complementares aos métodos tradicionalmente utilizados no ensino de engenharia.

O conceito da aprendizagem é demonstrado conforme as propostas das escolas nova e tradicional. Os alunos, por sua vez, são definidos de acordo com os diversos estilos de aprendizagem e destaca-se que a maioria dos estudantes de engenharia possui natureza **sensitiva**.

A importância de uma reflexão pedagógica é fortalecida com a verificação dos modelos mentais construídos pelos alunos, baseados na elaboração de imagens, principalmente quando submetidos a questões que envolvam fenômenos abstratos à percepção humana. A partir de então, é fornecida ao professor a possibilidade de buscar novas ferramentas e metodologias de ensino que melhorem o aprendizado, tais como modelos análogos e representações visuais, aplicando-as sempre que necessário, para que não se perca a comunicação professor-aluno e a escola mantenha atualizados seus paradigmas conforme a evolução tecnológica.

Baseado nesta pesquisa, este trabalho resulta no desenvolvimento de um software educacional utilizando programação orientada a objeto que verifica a estabilidade transitória de sistemas de energia elétrica considerando-se o modelo clássico para análise de primeira oscilação. O software oferece ao usuário a possibilidade de alterar os sistemas disponíveis, exibindo além de respostas numéricas, opções de visualização gráfica com controle tridimensional e animação virtual representando o comportamento dinâmico das máquinas síncronas que compõem o sistema.

Palavras chave: Estabilidade de sistemas, Estilos de aprendizagem, Programação orientada a objeto.

ABSTRACT

As it is common the association of the professor with a model or pattern to be followed, this work evidences the importance of the master in the classroom and starting from the study of the learning processes and of the students behaviour under different perspectives proposes the use of complemental instruments to the traditional methods applied in the engineering teaching.

The learning concept is demonstrated according to the proposals from new and traditional schools. The students are defined according to the several learning styles and stand out that most of the engineering students are **sensors**.

The importance of a pedagogic reflection is reinforced with the verification of the mental models built by the students, based on the images creation, mainly when they face questions that involve phenomena that seems abstract to the usual human perception. Starting from then it is provided to the teachers the possibility of seeking new tools and teaching methodologies that improve the learning, such as analogue models and visual representations, applying them when necessary, so that teachers and students have no lack of communication between themselves and the school keeps up with its paradigms according to the technological evolution.

Based on this research, this work results in the development of an educational software built with object-oriented programming that verifies the transient stability of energy systems using the classical model for first oscillation analysis. It is available to the user the possibility of changing the available systems, showing besides numerical answers, options of graphic visualization with three-dimensional control and virtual animation representing the dynamic behavior of synchronous machines that compose the system.

Key words: Learning styles, Object-oriented programming, Systems stability.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 - Ciclo de Kolb..... 9

FIGURA 02 - Pêndulo Mecânico..... 19

FIGURA 03 - Espaço tridimensional..... 19

FIGURA 04 - Visualização para análise de contingência..... 20

FIGURA 05 - Estabilidade de um Pêndulo..... 23

FIGURA 06 - Análogo Mecânico para Análise de Estabilidade em Sistemas de Potência..... 24

FIGURA 07 - Sistema Simplificado..... 25

FIGURA 08 - Potência versus Ângulo..... 26

FIGURA 09 – Pista..... 30

FIGURA 10 - Máquina Síncrona..... 31

FIGURA 11 - Sistema MBI..... 37

FIGURA 12 - Curva P x δ..... 38

FIGURA 13 - Sistema Multimáquinas..... 42

FIGURA 14 - Sistema Multimáquinas com Barras Internas e Cargas..... 43

FIGURA 15 – Sistema 3 barras..... 48

FIGURA 16 – Sistema transitoriamente estável..... 56

FIGURA 17 – Sistema transitoriamente instável..... 56

FIGURA 18 – Dados do sistema..... 59

FIGURA 19 – Arquivo de ajuda..... 60

FIGURA 20 – Plataforma bilíngüe..... 61

FIGURA 21 – Trecho em falta..... 62

FIGURA 22 – Dados de simulação..... 63

FIGURA 23 – Editor de textos..... 64

FIGURA 24 – Ângulo x Tempo..... 65

FIGURA 25 – Velocidade x Tempo..... 65

FIGURA 26 – Tensões internas dos geradores..... 66

FIGURA 27 – Tensões nas barras do sistema..... 66

FIGURA 28 – Controle tridimensional..... 67

FIGURA 29 – Comportamento dinâmico do rotor..... 68

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Dimensões de Kolb..... 9

TABELA 2 – Índice de Estilos de Aprendizagem..... 13

TABELA 3 – Parâmetros em falta..... 53

TABELA 4 – Parâmetros pós-falta..... 54

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA..... ii
AGRADECIMENTOS..... iii
RESUMO..... v
ABSTRACT..... vi
LISTA DE FIGURAS..... vii
LISTA DE TABELAS..... ix

1. INTRODUÇÃO..... 1

2. PROCESSOS DE APRENDIZAGEM..... 6

2.1 Estilos de Aprendizagem..... 8
2.2 Ciclo de Kolb..... 8
2.3 Modelo de Aprendizagem de Felder e Silverman..... 12
2.4 Modelos Mentais..... 15
2.5 Recursos Visuais..... 18

3. SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA..... 21

3.1 Estabilidade de Sistemas de Energia..... 22
3.2 A Relação Potência versus Ângulo..... 25
3.3 A Estabilidade Transitória..... 27
3.4 Modelagem Matemática..... 31
3.5 Um Sistema Máquina versus Barra Infinita (MBI)..... 36
3.6 Sistema Multimáquinas..... 40
3.7 Estudo de Caso..... 47

4. DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE..... 57

4.1 Estabilidade Visual..... 58

5. CONCLUSÕES..... 69

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 71

TRABALHOS PUBLICADOS……...……. 75

APÊNDICES

APÊNDICE A - Código para Resolução do Método Runge-Kutta de 4ª. Ordem..... 76

ANEXOS

ANEXO 1 – Índice de Estilos de Aprendizagem (ILS)..... 78
ANEXO 2 – Estilos de Aprendizagem e Estratégias..... 88
ANEXO 3 - Resolução Numérica de Equações Diferenciais Não-lineares..... 94

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O conhecimento acumulado ao longo da evolução humana é transmitido seguindo padrões e normas pré-elaboradas, centrado no professor, sendo o aluno elemento passivo deste processo. Esta metodologia é fortemente ligada a aulas expositivas, transmissão oral de informações, livros-texto, constituindo uma base histórica cultural herança de concepções religiosas, tal como das escolas Jesuíticas primeiramente instaladas no Brasil e organizações militares.

As bases da escola tradicional refletem em sua estrutura um modelo organizativo e disciplinador, a normativa relação professor-aluno induz a atenção, silêncio e concentração para transmissão dos conhecimentos. Ao professor não é permitida grande variação do conteúdo programático e aos alunos é imposto um sentido único de aprendizagem partindo do geral para o particular, do distante para o próximo, dificilmente deixando a fase abstrata e criando relações entre aprendizado, vida e problemas atuais.

O conhecimento, transmitido em blocos, não requer mudanças internas no aluno que será avaliado por sua capacidade de memorizar e repetir os conceitos vistos em exercícios de fixação. O professor explica os conteúdos, o aluno faz anotações e estuda para verificação de aprendizagem, usualmente por meio de prova, não se preocupando em buscar novas soluções para os problemas ou identificar novos problemas, fato que lhe será solicitado na vida profissional. Apesar de todas as pesquisas existentes e todo material didático disponível os professores não são levados a esta reflexão e geralmente ensinam da forma como aprenderam (VIEIRA JUNIOR e COLVARA, 2006a).

Apenas dizer que os professores devem preparar-se pedagogicamente não é suficiente, é preciso estimulá-los a constante busca pela qualidade e aprimoramento do ensino, uma vez que durante a carreira acadêmica raramente são questionados quanto aos seus procedimentos didáticos. De acordo com CORREIA e CHENG (2000) os docentes, principalmente das áreas tecnológicas, não possuem formação pedagógica e o sistema de ensino tem apontado a prática educacional do professor como uma de suas principais deficiências. Em se tratando o Brasil de um país onde a maior parte dos egressos de cursos de pós-graduação *Stricto Sensu* atuam no magistério, ações como a inclusão de disciplinas didático-pedagógicas e outras, na formação deste profissional poderiam minimizar esta deficiência. Além de tudo, o professor representa um protótipo a ser seguido e deve ser levado a refletir quanto à importância e responsabilidade de sua atuação em sala de aula. Por exemplo, um curso deficiente de física no ensino médio por não se aplicar um método de ensino que encontre as expectativas do aluno pode afastá-lo da área independentemente de sua aptidão para tal.

A escola nova, por sua vez, propõe um estreitamento da relação professor-aluno e os processos didáticos reforçam a relação entre teoria e prática. O processo de aprendizagem parte da experiência do aluno, observando e agindo sobre realidades concretas, buscando atingir todos os aspectos da formação: física, intelectual, moral e social. A avaliação nesta concepção de ensino é aplicada de forma mais qualitativa sobre todos estes aspectos. O professor se torna facilitador da aprendizagem, as abstrações são resultados de experiências, do fazer e do agir.

Poucas escolas estimulam, exigem uma reflexão pedagógica, tampouco oferecem um ambiente propício a esta consciência em seu planejamento docente. Para tanto, o professor requer um tempo superior ao utilizado em sala de aula para elaboração, definição de estratégias e construção de ferramentas de ensino. Também são necessárias melhores

condições estruturais que favoreçam a compreensão e não puramente a fixação dos conteúdos. O autoritarismo tradicional cede espaço para uma participação mais efetiva, responsável e crítica no processo de ensino.

Os avanços das pesquisas em educação apontam que as ferramentas lançadas pelos alunos para construir suas estruturas cognitivas podem ser mais bem trabalhadas, sendo o ser humano sujeito ativo na construção de seu conhecimento. O professor, mediador deste processo, orienta, organiza e estrutura recursos para as atividades de ensino, sua presença perde a postura única de transmissor e avaliador do conhecimento, ele auxilia o aluno a relacionar o novo conteúdo com o anterior e a interpretar o desconhecido de uma forma concreta a partir da ação e investigação.

Um índice de qualidade do processo educacional, entre outros, pode ser representado por sua capacidade de transmitir o conhecimento e fazer com que ele tenha um significado concreto para o aluno, assim, esta concepção de ensino assume que ao preparar a aula o professor deve conhecer o nível de desenvolvimento em que se encontra o aprendiz. Este aspecto pode definir uma incompatibilidade de pensamentos entre o professor, profundo conhecedor do conteúdo, e aluno, muitas vezes tendo seu contato inicial com a matéria. O professor habituado com termos e simbologias referente ao tema por vezes deixa passar detalhes simples que ao estudante ainda não pareceram coerentes. Se a introdução ao conteúdo for vaga o aluno não acompanhará em tempo real o progresso, nem será capaz de interagir de forma crítica aos fatos e teorias. Portanto, a experiência do professor e provável imaturidade do aluno em relação ao tema apresentado, não devem permitir que se perca o diálogo entre os mesmos, uma vez que a comunicação é o elo que conecta as partes no ciclo de aprendizagem.

Conforme LIMA (2002) a proposta de ensino via computador, se bem aplicada, oferece estímulos para interação do aluno e do conhecimento científico com aplicações reais. O maior responsável pela evolução tecnológica mundial em todas suas concepções foi a era digital. O inter-relacionamento de tecnologia, conceituação teórica e necessidades do mercado definem a importância deste investimento uma vez que as competências requeridas após a informatização não são as mesmas que antes. É inevitável que esta ferramenta adentre os meios escolares para que o processo seja único e contínuo. A incorporação da tecnologia no processo de ensino amplia de forma substancial os horizontes perceptivos do aluno quanto aos conteúdos; entretanto, é importante ressaltar que este avanço deve sempre vir acompanhado de uma reflexão de ensino e consciência didática na relação professor-aluno-conhecimento. Um fator contribuinte é o dinamismo das novas gerações de alunos, que é cada vez maior em virtude da realidade virtual na qual os jovens vêm se desenvolvendo. A partir destas afirmações uma série de estudos atuais e metodologias recém propostas para educação presencial e também à distância entram em questão, tal como, a aplicação de recursos multimídia de forma geral etc.

As Diretrizes Curriculares dos Cursos de Engenharia (MINISTÉRIO DA EDUCACAO E DO DESPORTO, 2002) buscam contrapor a preocupação tão somente com o conteúdo a ser ensinado, possibilitando que as Instituições de Ensino Superior se tornem flexíveis e abrangentes na formação do profissional, abrindo espaço para atividades complementares que ampliem os conhecimentos sócio-culturais e os horizontes generalistas dos egressos dos cursos de engenharia.

Este trabalho propõe uma reflexão quanto aos métodos tradicionalmente utilizados, não os criticando de forma a extingui-los, mas sim buscando incorporar de forma cada vez mais expressiva a tecnologia no ambiente escolar, somando à concepção tradicional de ensino um

comportamento reflexivo a partir de novos artifícios baseados nas características distintas dos diversos tipos de alunos e na habilidade humana em se trabalhar com visualizações. Esta necessidade se confirma em vista do ambiente dinâmico dos dias atuais e da criação dos modelos mentais para compreensão dos fenômenos físicos essencialmente abstratos e invisíveis à sensibilidade comum, que compreendem os cursos de engenharia. Um professor bem preparado e de posse deste conhecimento pode então fazer uso de diferentes ferramentas educacionais para atingir seus objetivos e aumentar a eficiência do processo de ensino e aprendizagem como um todo.

CAPÍTULO 2

PROCESSOS DE APRENDIZAGEM

Para explicar a aprendizagem e sua natureza duas concepções seriam facilmente lançadas: o apriorismo e o empirismo. A abordagem do conhecimento que nasce com o indivíduo e a aceitação de fatores independentes da experiência é chamada apriorismo. O conhecimento como algo que vem de fora e se instala no indivíduo por sua vivência no assunto é definido por empirismo. Apesar de divergentes, estes conceitos apresentam uma visão passiva deste processo. Em BECKER (1994) nota-se que a absorção das informações independe da trajetória hereditária e a das condições evolutivas em que vive o aprendiz definindo o ser humano como um projeto a ser construído. Esta tese é uma fusão das teorias já existentes e define que todo conhecimento não seja, a priori, apenas inerente ao indivíduo (apriorismo) nem unicamente resultado de sua observação e experiência (empirismo), mas sim de ambos e que a aprendizagem em qualquer nível ocorre através da interação do indivíduo com o meio.

A descoberta do novo causa um conflito cognitivo, e um processo de equilíbrio faz a ligação entre as informações já existente e a novidade recém descoberta. Prova-se, então, que o conhecimento inato ou fatores hereditários influenciam o desenvolvimento, mas não é condição suficiente para explicá-lo; a pura experiência adquirida pelas ações é importante, mas também insuficiente uma vez que fatores internos são ativados sempre que se relaciona com um meio físico ou social.

A **aprendizagem** é definida como a ação do homem de assimilar um objeto, esta ação assimiladora transforma o objeto do ponto de vista do homem para algo então interpretado e

compreendido. O objeto, por sua vez, se não totalmente compreendido resiste às ferramentas utilizadas para sua assimilação; assim, o homem refaz ou constrói novas ferramentas capazes de interpretar objetos cada vez mais complexos. Este processo é contínuo, o aluno tende sempre a adaptar-se frente às descobertas e elaborar a partir de então sua inteligência. Novos níveis de conhecimento são constantemente criados através das interações do indivíduo.

A idéia principal desta teoria resume-se em que a aprendizagem não é um processo passivo, não se nasce sabendo nem se aprende puramente pela experiência vivenciada, a inteligência é dinamicamente construída a partir de nossas possibilidades e **interesses** em lidar com pessoas e objetos.

As interações mencionadas não dizem respeito a exclusivas ações físicas. O ato de fazer e reproduzir produz a abstração empírica de onde se analisa o resultado prático desta ação, as propriedades físicas e as conseqüências deste experimento (como por exemplo, aulas de laboratório). Para assimilação do conhecimento é necessária a organização mental destes efeitos, as conexões entre dados, teorias, resultados e novas visões sobre o fato, criar relacionamentos e coordenar estas relações. Portanto, em determinada situação o sujeito é capaz de produzir experiências simbólicas e reflexões independentes da prática (abstração reflexiva).

A compreensão do sentido da aprendizagem sob diferentes perspectivas é importante para que educadores iniciem uma reflexão sobre seus métodos e busquem alternativas que despertem este **interesse** nos alunos, aplicando e adequando-as quando necessário, para que a educação evolua e atualize-se tal como o incessante desenvolvimento tecnológico mundial.

2.1 Estilos de Aprendizagem

A análise proposta é aqui apresentada por duas frentes: (1) de forma mais ampla através do estudo da aprendizagem por diferentes estruturas educacionais e (2) de forma mais específica com a análise dos diversos estilos de aprendizagem desenvolvidos pelos alunos. Esta descoberta traz um pensamento diferenciado quanto ao sistema de ensino utilizado, transmitido de geração a geração. Cada aluno tem sua maneira própria de aprender e relacionar o conhecimento em seu íntimo e esta flexibilidade didática pode aumentar a eficácia na transmissão do conhecimento quando se percebe que um determinado conteúdo não foi bem interpretado em sala de aula.

2.2 Ciclo de Kolb

O **Modelo de Kolb de Aprendizado Experimental** está presente nas mais diversas discussões que envolvem teoria e prática da educação adulta (SMITH, 2005). Embora existam divergências sobre alguns de seus conceitos, sua excelente base para o planejamento das atividades de ensino e a função de guia na compreensão das dificuldades do processo de aprendizagem é reconhecida.

Segundo PEREIRA (2005), a partir deste modelo, o processo de aprendizagem pode ser classificado por duas dimensões características: a percepção da informação e o processamento da informação. A Figura 1, adaptada de PEREIRA (2005), representa a dimensão da percepção por uma linha cujas extremidades representam o sentir e o pensar, assim, a forma com que um novo conteúdo é adquirido pelo aluno se encontra em algum ponto intermediário desta linha. O processamento da informação é de igual forma representado, por uma linha cujas extremidades indicam o fazer e o observar.

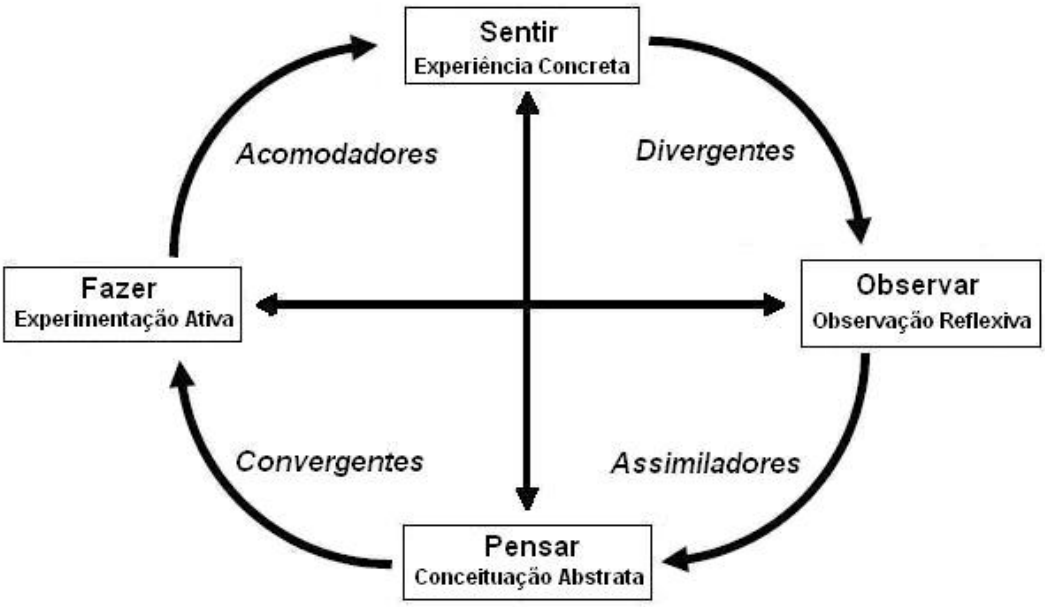


Figura 1 – Ciclo de Kolb.

Em termos de ensino é considerado ideal o caso em que o professor percorra todos os pólos da Figura 1, identificando os métodos e ferramentas necessários para cada ciclo, atingindo assim os diferentes estilos de alunos. O ciclo de aprendizagem (ou ciclo de Kolb) pode ter início em qualquer um dos quatro pontos, contudo, é suposto que os passos deste processo sigam a ordem, conforme os estágios classificados por Kolb na Tabela 1:

Tabela 1 – Dimensões de Kolb.

Experiência concreta	Marca o início do processo de aprendizagem onde o aluno se envolve em novas experiências.
Observação reflexiva	Neste estágio o aluno reflete sobre o novo conteúdo de acordo com suas possibilidades sob diferentes pontos de vista.

Conceituação abstrata	Aqui se utiliza lógica e racionalidade para compreender os problemas e conceituar teoricamente o conteúdo.
Experimentação ativa	Nesta fase o aprendiz aplica ativamente a teoria na resolução de problemas ou tomada de decisões.

O aluno deve tender a um dos pólos de cada uma das dimensões, estando cada indivíduo em algum ponto entre experiência concreta e conceituação abstrata; e entre experimentação ativa e observação reflexiva. A partir de então, Kolb classificou quatro estilos de aprendizagem básicos que melhor se relacionam com os estágios do processo de aprendizagem:

- **Divergentes:** os divergentes percebem a informação sensorialmente através da experiência concreta e as processam pela observação reflexiva, possuem criatividade, vasto interesse sócio-cultural, facilidade em propor ações e percepção a ponto de não necessitar de experiência ativa para o entendimento. Eles são assim chamados pela facilidade de compreender por diferentes perspectivas. Os elementos desse estilo buscam no professor a função de um motivador e sua pergunta característica é: Por quê? (Ex: Por que este conteúdo é importante?);

- **Assimiladores:** os assimiladores percebem a informação por conceituação abstrata e as processam pela simples observação reflexiva, são dedutivos na resolução de problemas, lidam com conceitos abstratos, ágeis em criar modelos teóricos. Eles recebem este nome porque analisam, organizam e assimilam o conhecimento para

aprender. Os elementos desse estilo buscam no professor a função de um especialista e sua pergunta característica é: O que? (Ex: O que é necessário para resolver esta questão?);

- **Convergentes:** os convergentes percebem a informação por conceituação abstrata, porém, as processam por experimentação ativa, são hábeis em aplicar na prática o conhecimento, tomar decisões e solucionar problemas, não são emotivos e possuem interesses estreitos. Chamados assim, por convergir ou buscar resultados de maneira rápida. Segundo Kolb este é o estilo presente no perfil de muitos engenheiros. Os elementos desse estilo buscam no professor a função de um treinador que orienta a prática e sua pergunta característica é: Como? (Ex: Como deve ser resolvido?); e

- **Acomodadores:** os acomodadores percebem a informação pelos sentidos na experiência concreta e as processam ativamente por experimentação ativa, são ativos, possuem espírito de liderança, buscam soluções intuitivas, gostam de executar, envolver-se em novas tarefas e correr riscos. Recebem o nome de acomodadores porque adaptam as informações para seu uso pessoal as aperfeiçoando quando necessário. Os elementos desse estilo esperam que o professor os permita descobrir sozinhos as respostas e sua pergunta característica é: E se? (Ex: E se fosse resolvido por outro método?).

De modo geral o comum nas metodologias tradicionais de ensino são as fases “O que” e “Como” serem consideradas e executadas pelo professor, onde o que é preciso para solucionar problemas e a forma pela qual isto é feito é demonstrado. Ao utilizar um único

estilo de aprendizagem alguns indivíduos são postos em desvantagem durante o processo educacional, e ao percorrer todo o ciclo o professor satisfaz os variados estilos de aluno. Depois do último estágio o ciclo pode ser reiniciado, uma vez que este processo é contínuo. Contudo é importante que o professor conheça esta diversidade de comportamentos para que possa buscar novas ferramentas, se necessárias, apropriadas para cada estilo de aluno e concepção de aprendizagem conforme descrito.

2.3 Modelo de Aprendizagem de Felder e Silverman

Na literatura encontram-se muitos modelos de estilos de aprendizagem que podem determinar as preferências e as facilidades em adquirir conhecimento de certo grupo de estudantes ou de um indivíduo em específico. Aqui será apresentado o **Modelo de Aprendizagem de Felder e Silverman**, base desta pesquisa, e por ele podem-se classificar os alunos em quatro dimensões (detalhadas na Tabela 2):

- Percepção (sensorial ou intuitiva);
- Entrada (visual ou verbal);
- Processamento (ativo ou reflexivo);
- Entendimento (seqüencial ou global).

Tabela 2 – Índice de estilos de aprendizagem.

Percepção sensorial	Apreciam fatos, dados, experimentos, métodos padrões, tem facilidade para memorização e preferem abstrair informações pelos seus sentidos (vendo, ouvindo, tocando e etc.).
Percepção intuitiva	Apreciam princípios, conceitos e teorias, não se atentam a detalhes, não gostam de repetição, se interessam por desafios, analisam possibilidades, significados e relações entre as coisas.
Entrada visual	Assimilam mais o que vêem (figuras, gravuras, diagramas, fluxogramas, filmes e etc.).
Entrada verbal	Preferem explicações escritas ou faladas à demonstração visual, extraem mais informações em uma discussão.
Processamento ativo	Preferem experimentar ativamente que observar e refletir. Gostam de processar as informações enquanto em atividade e não aprendem de forma passiva.
Processamento reflexivo	Preferem sozinhos e silenciosamente processar a informação. Fazem ligações teóricas com a fundamentação da matéria e não extraem muito quando não são levados a pensar.
Entendimento seqüencial	Aprendem de forma linear, por etapas seqüenciais, com o conteúdo se tornando progressivamente complexo.
Entendimento global	Aprendem em grandes saltos, sintetizam o conhecimento e podem não ser capaz de explicar como chegaram às soluções.

Embora em algumas situações um mesmo indivíduo possa apresentar diferentes tendências, na sala de aula cada aluno pode ter um determinado potencial e uma característica específica. No Anexo 1 é apresentado um questionário utilizado para identificar a tipologia dos estudantes, e no Anexo 2, estratégias e sugestões para melhor aproveitar estas características individuais. Ambos propostos por FELDER e SOLOMAN (2006) e traduzidos por GIORGETTI e KURI (2006).

Normalmente o professor aplica o método que lhe parece mais familiar, mas isto pode não refletir o mesmo sentimento nos alunos, sendo necessária uma compatibilidade entre os interesses individuais aluno-professor para que o aprendizado ocorra de modo mais eficiente. Assim propõe-se, portanto, utilizar esta análise para atingir o maior número possível de alunos, buscar o equilíbrio ou mudar o método de transmissão sempre que um conteúdo, em geral os que representam fenômenos físicos invisíveis, não tenha sido bem compreendido.

Ainda, segundo FELDER e SILVERMAN (1988) a maioria dos professores dos cursos de engenharia é **intuitiva**, enfatizando conceitos e palavras no lugar de fatos e imagens para transmitir informação, enquanto a maior parte dos alunos é **sensitiva**. Como visto, sensitivos gostam de fatos, dados e experimentação; intuitivos preferem princípios e teorias. Sensitivos gostam de resolver problemas por métodos padrão e não gostam de surpresas; intuitivos apreciam inovação e desaprovam a repetição. Sensitivos são pacientes com detalhes, mas não gostam de complicações; intuitivos se aborrecem com pormenores e complicações lhe são bem vindas. Sensitivos são bons em memorizar fatos e os intuitivos em se prender a conceitos. Sensitivos são cuidadosos, porém, lentos; intuitivos agem com maior velocidade, entretanto, podem ser descuidados. Em se tratando de tendências, cabe lembrar que mesmo um forte estilo de aprendizagem pode manifestar sinais de um outro elemento em ocasiões diversas. Todavia, não se atentar a estas características pode favorecer uma parcela do grupo

de comportamento similar e tornar o aprendizado improdutivo para os demais. Esta afirmação leva a dizer que uma mudança no método de ensino, sempre que identificada sua necessidade pelo professor, e o desenvolvimento de modelos sensitivos, pode fortalecer a formação acadêmica nos cursos de engenharia, gerando um profissional com características melhor trabalhadas no atinente a disputa pelo mercado de trabalho (VIEIRA JUNIOR e COLVARA, 2006b).

2.4 Modelos Mentais

Em diversas ocasiões durante uma aula expositiva cujos artifícios empregados se limitam ao formato descritivo e discursivo perde-se a razão do entendimento ou a capacidade de acompanhar o que é apresentado. Fato identificado como um problema didático comumente encontrado onde não há uma melhor estruturação do conhecimento e também não se aplicam estruturas semânticas apoiadas por simbologias que facilitem trabalhar com grandes quantidades de informações complexas.

De acordo com MELEIRO e GIORDAN (2003) para produção do aprendizado ocorre a criação de um modelo mental que precede o registro de novas informações. Estes modelos são elaborados intuitivamente a partir das habilidades em relacionar novas descobertas com experiências prévias. Representações por imagens como meio de comunicação visual vem sendo utilizadas desde o surgimento da ciência tais como: gráficos, ilustrações e atualmente o emprego de tecnologias digitais para facilitar o aprendizado. Estes recursos aliados às discussões teóricas estabelecidas contribuem para formação destas concepções mentais. Portanto, as estruturas internas criadas para assimilação de um conteúdo, baseadas em

imagens, a partir do conjunto de informações utilizadas pelo professor (modelos científicos) dão origem aos chamados **modelos mentais** (BORGES, 1999).

Com base na teoria segundo a qual aprendemos ativamente verifica-se que em todo processo de aquisição de informações é elaborada de forma mental uma representação cujo modelo tenha um significado real para o fenômeno estudado, caracterizando, portanto, a construção de significados.

Não se define de forma concreta o que é um modelo mental, tampouco como ele é formado na mente de outras pessoas. De forma simples pode-se compreender que a busca pelo entendimento e o ato de pensar envolve a construção pessoal de um significado para o experimento em questão, e mesmo quando são apresentados modelos pré-elaborados para descrever o funcionamento de tal coisa, individualmente, cada pessoa constrói um modelo daquilo que entendeu e simula estas estruturas de acordo com suas aptidões. Se o resultado desta produção é incoerente com o funcionamento real, a composição do sistema, assim como todo o processo é repetido baseado em novas pesquisas, horas de estudo ou diferentes explicações do professor (em referência aos variados estilos de aprendizagem) até que os resultados desta simulação mental estejam de acordo ou o mais próximo possível de um nível de entendimento aceitável.

Essa criação mental é um meio de realizar ações internas e processá-las como se fossem externas, organizando o conhecimento sobre determinado assunto e simulando os processos ou fenômenos na imaginação humana. Os modelos desenvolvidos a partir dos métodos de ensino utilizados para transmissão do conhecimento podem ser determinantes para formação científica. Neste aspecto, GENTNER e GENTNER (1983) a mais de duas décadas já defendiam a idéia de que os modelos mentais criados por estudantes sobre a atuação da

corrente elétrica influenciam o modo como eles tratam problemas envolvendo circuitos elétricos.

Os modelos iniciais propostos ou as técnicas adotadas para sua formulação na mente do estudante não devem ser excessivamente complexos a fim de que eles não sejam desmotivados ou conduzidos à confusão. Quanto mais experiente em determinado assunto e quanto maior o domínio adquirido pelo aluno em relação ao tema estudado, mais sofisticados e próximos à realidade vão se tornando estes modelos. Quando um modelo é apresentado pelo professor para explicar determinado fato, diferentes tipos de informações podem ser ou não inseridas neste contexto de acordo com os objetivos de ensino. Com o progresso do curso, modelos mais detalhados devem ser apresentados e tais informações se tornam importantes. Todavia, merece atenção o fato de que quando se pretende analisar diferentes questões de um mesmo conteúdo, representações distintas devem ser elaboradas não se utilizando os mesmos modelos para propósitos diferentes.

As estratégias de ensino, o vocabulário adotado, exemplos práticos e toda metodologia empregada pelo professor devem estimular, favorecer o raciocínio e a construção mental para que os modelos desenvolvidos pelos estudantes sejam cada vez mais completos em relação aos componentes que formam os sistemas a serem estudados. Sempre que o aluno revê e aprimora os modelos que usa para descrever ou explicar um fenômeno isto significa que o aprendizado ocorreu sob uma nova perspectiva e informações adicionais foram incluídas no modelo antigo que ele possuía.

2.5 Recursos Visuais

Conforme as teorias anteriormente vistas pode-se concluir, de forma sucinta que:

- O emprego correto da tecnologia no ensino é uma ferramenta atrativa que estimula e favorece a interação do aluno com o conteúdo, fator essencial para aprendizagem;
- Os estilos de aprendizagem definem a natureza dos alunos e destaca-se que a maioria dos alunos de engenharia é **sensitiva,** preferindo abstrair informações pelos seus sentidos; e
- O homem possui a habilidade em adquirir significados a partir da construção de imagens de acordo com a criação dos modelos mentais.

Deste modo, defende-se o desenvolvimento e utilização de metodologias e ferramentas de apoio ao ensino que atendam a estas condições e atuem como artifícios auxiliares aos métodos tradicionais, buscando preencher as necessidades do aluno **sensitivo,** foco deste trabalho.

Nesse sentido apresentam-se trabalhos como o de COLVARA e SÁ (2005) em que se enfatiza a importância da elaboração de modelos análogos, equivalentes ao funcionamento de sistemas reais. Neste caso se mostra que um pêndulo simples, conforme Figura 2, apresenta comportamento dinâmico equivalente a uma máquina síncrona ligada a um barramento infinito e com algumas considerações chega-se estabelecer analogia entre a tensão interna e o (inverso do) comprimento do pêndulo, mostrando que controlar este comprimento equivale a controlar a tensão da máquina. Esta estratégia favorece o aprendizado de conceitos complexos do ponto de vista da percepção comum.

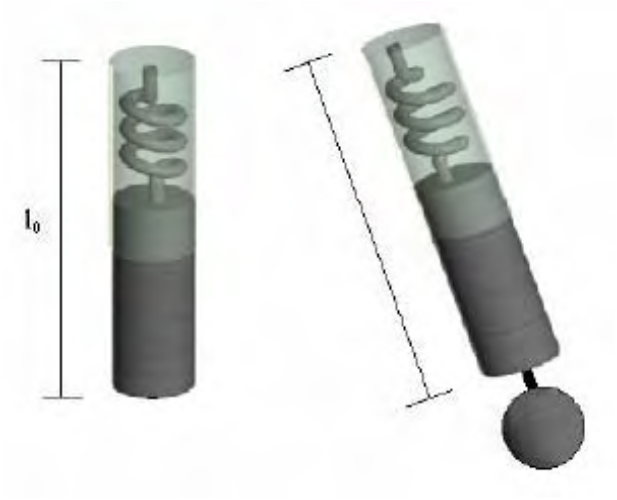


Figura 2 – Pêndulo Mecânico.

No trabalho de SOUZA et al. (2000), exibido na Figura 3, destaca-se o desenvolvimento de recursos virtuais tridimensionais com o objetivo de amenizar algumas das dificuldades encontradas no ensino da teoria eletromagnética, dentre estas, a visualização espacial das funções do campo eletromagnético que modelam as conseqüências da presença de cargas e correntes no ambiente analisado.

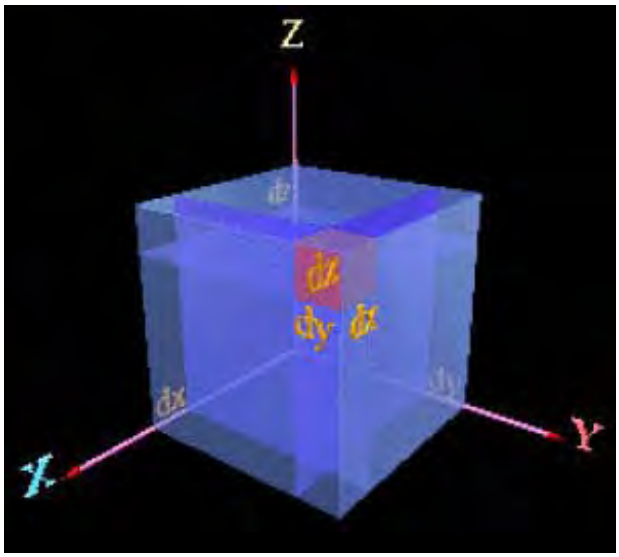


Figura 3 – Espaço tridimensional.

A eficiência destes recursos também pode ser vista em OVERBYE (2004), onde conforme Figura 4, a inovação e interatividade promovida pela representação de sistemas em três dimensões auxiliam operadores e engenheiros a compreender de modo rápido e intuitivo contingências em um sistema de potência.

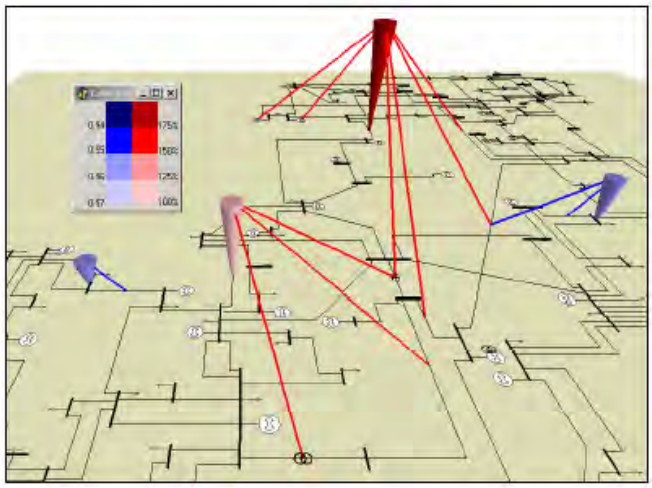


Figura 4 – Visualização para análise de contingência.

Baseado na facilidade humana em lidar com imagens e construir significados, na necessidade dos alunos de engenharia em trabalhar com exposições sensoriais e na possibilidade de maior interação aluno-conteúdo com o uso de tecnologia; foi desenvolvido ao longo deste trabalho um software educacional com propósito de auxiliar a compreensão do comportamento dinâmico de máquinas síncronas atuando como geradores de energia em decorrência de fenômenos tais como grandes perturbações em um sistema elétrico de potência.

Antes, porém, faz-se no próximo capítulo uma descrição da complexidade que envolve o estudo dos sistemas elétricos em específico quanto aos problemas de estabilidade transitória.

CAPÍTULO 3

SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Um Sistema Elétrico de Potência é constituído basicamente por geradores, linhas de transmissão e cargas, e é construído com o objetivo de atender a demanda de potência de determinada região atendendo as restrições de confiabilidade e qualidade de tensão e freqüência. O projeto de um Sistema Elétrico além de apresentar perspectiva da expansão do consumo de energia deve possibilitar a operação satisfatória do sistema em regime permanente e ser flexível à presença de perturbações ou faltas de modo a garantir a continuidade da prestação do serviço.

O alto investimento para ampliação dos Sistemas Elétricos existentes ou construção de novas redes, associado à necessidade de maior confiabilidade em virtude do aumento da demanda de energia com o passar dos anos, resultou em uma interligação cada vez maior entre os diversos sistemas de geração existentes. Esta interligação apresenta vantagens diversas como o suprimento de grandes cargas conectadas subitamente, a compra e venda de energia entre os sistemas conectados e etc. O Sistema Interligado Nacional (SIN) possui tamanho e características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial. No Brasil uma mínima porcentagem da capacidade de produção de eletricidade encontra-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados. Tamanha complexidade pode ser verificada a partir do Sistema de Informações Geográficas Cadastrais do SIN (SINDAT) que registra atualmente 560 usinas e subestações e 1079 linhas de transmissão que constituem a rede de atuação do Operador Nacional do Sistema (ONS, 2006).

Entretanto, esta ação que conecta unidades geradoras, cargas e linhas, gera também alguns inconvenientes uma vez que, quanto maior sua dimensão mais complexa se torna a operação do sistema. Dentre algumas dificuldades destaca-se o aumento do risco de *black-out*, a incidência de correntes de curto-circuito mais elevadas, entre outros. Assim, torna-se necessário um estudo ainda mais bem detalhado dos esquemas de proteção e análises rápidas das condições de estabilidade que descrevem o comportamento de todo um sistema a partir de perturbações externas indesejáveis. A este fato se destina este capítulo.

3.1 Estabilidade de Sistemas de Energia

O conceito de estabilidade pode ser intuitivamente compreendido a partir de analogias com fenômenos conhecidos. Um elemento é dito estável quando uma certa perturbação o retira de seu estado desejado e depois de eliminada a perturbação ele consegue retornar ao seu estado original ou a outro estado aceitável.

Na Figura 5 (a) o pêndulo encontra-se fixo a um ângulo δ com velocidade ω igual a zero. Se solto nesta posição, intuitivamente, percebe-se que a força gravitacional o levará a outra posição o fazendo oscilar até o repouso com ângulo zero conforme a referência tracejada. Portanto a posição inicial não é um estado de equilíbrio, pois a aceleração não é nula e ele não pode por si só permanecer indefinidamente nesta posição. Na Figura 5 (b) muda-se a posição inicial e sabe-se que o pêndulo se solto nesta posição (com velocidade igual a zero) ali permanecerá indefinidamente até que alguma perturbação o retire deste ponto, portanto, $\delta = 0$ é uma posição de equilíbrio natural do sistema. Daqui conclui-se que pontos de equilíbrio do pêndulo são caracterizados fisicamente por aceleração e velocidade nulas. A posição inicial definida na Figura 5 (c) caracteriza também um ponto de equilíbrio,

porém, fundamentalmente diferente do caso anterior. Na posição (b) percebe-se que mesmo após a ocorrência de uma perturbação, após certo tempo, o pêndulo retorna ao seu estado inicial. Já em (c) por menor que seja esta perturbação, ele não mais retornará ao seu estado original. Define-se então o conceito de ponto de equilíbrio **estável** e ponto de equilíbrio **instável** (BRETAS e ALBERTO, 2000).

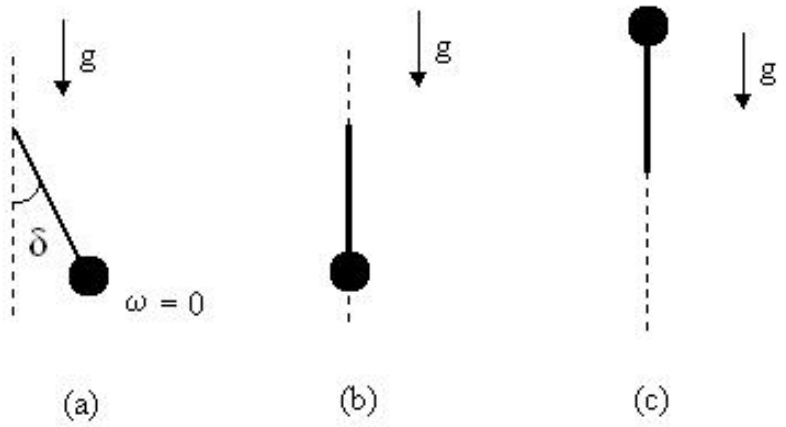


Figura 5 – Estabilidade de um Pêndulo.

Em um sistema elétrico, o fluxo de potência ativa nas linhas de transmissão está diretamente relacionado às diferenças entre os ângulos de fase dos geradores. Em condições de regime permanente, as diferenças entre os ângulos de fase devem permanecer constantes para que o fluxo de potência também permaneça. Neste modo todas as máquinas possuem a mesma velocidade angular e a potência gerada é exatamente a potência absorvida pelas cargas somada às perdas na transmissão, estando o sistema em um ponto estável de operação. O sistema, assim, permanecerá indefinidamente, a não ser que alguma perturbação o retire deste estado. E, então, considerada a ocorrência de um distúrbio, deseja-se saber se o sistema

encontrará um novo ponto de equilíbrio ou se irá se tornar instável afastando-se indefinidamente de um ponto de operação satisfatório.

A partir do comportamento do pêndulo é possível a criação de um modelo mental que faz referência ao comportamento da máquina síncrona como unidade geradora em termos da estabilidade e pontos de equilíbrio. No entanto, um Sistema Elétrico de Potência real, conforme dito anteriormente apresenta interligações de diversos sistemas o que aumenta substancialmente sua complexidade e operação. Uma nova analogia pode, então ser empregada de acordo com a Figura 6 (ELGERD, 1978):

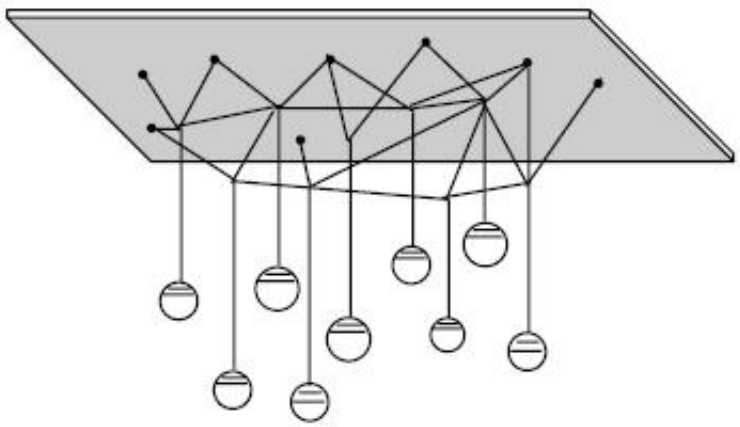


Figura 6 – Análogo Mecânico para Análise de Estabilidade em Sistemas de Potência.

Os geradores de energia podem ser representados por várias massas suspensas por uma rede de cordões elásticos, que por sua vez representam as linhas de transmissão. Novamente considera-se o sistema em condição de regime permanente, onde cada elástico encontra-se carregado abaixo do seu ponto de ruptura, ou seja, cada linha opera abaixo de seu limite de estabilidade. Em determinado momento um dos cordões é subitamente cortado. Meio a este

emaranhado de massas (geradores) pode se imaginar dois efeitos: o sistema encontrará um novo estado de equilíbrio, caracterizado por um novo conjunto de forças que atuarão nos cordões; ou devido às forças transitórias, demais cordões podem se perder ocasionando enfraquecimento da rede ou rompimento em cadeia das linhas levando o sistema a um eventual colapso.

Como os sistemas de potência dependem das máquinas síncronas para geração de energia e a sua operação satisfatória em regime permanente exige que todas as máquinas permaneçam em sincronismo, a dinâmica dos ângulos de potência e do rotor e suas relações em função destas forças transitórias influenciam o aspecto de estabilidade.

3.2 A Relação Potência versus Ângulo

A Figura 7 (KUNDUR, 1994) a seguir apresenta um modelo simplificado de um sistema elétrico de potência (gerador, linha e motor):

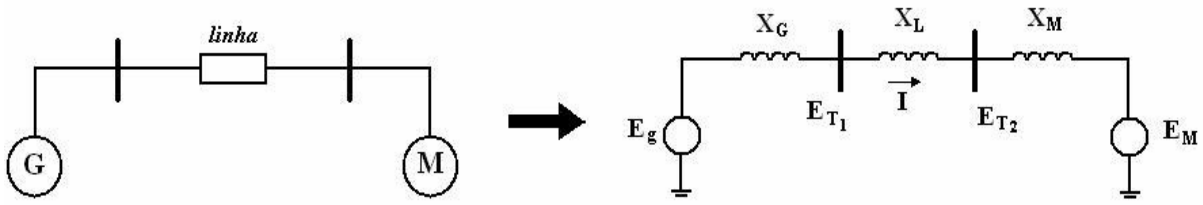


Figura 7 – Sistema Simplificado.

Conforme visto, uma importante característica na estabilidade de Sistemas de Potência é que a transferência de potência do gerador para o motor é função da separação angular (δ)

entre os rotores das máquinas síncronas. Esta separação angular, mostrada na Figura 8 (KUNDUR, 1994), é devida a três componentes:

- Ângulo interno do gerador δ_G - ângulo pelo qual o rotor conduz o campo girante do estator;
- Diferença angular entre os terminais de tensão do gerador e motor δ_L – ângulo pelo qual o campo do estator do gerador se difere do campo do estator do motor; e
- Ângulo interno do motor δ_M – ângulo pelo qual o rotor se atrasa do campo girante do estator.

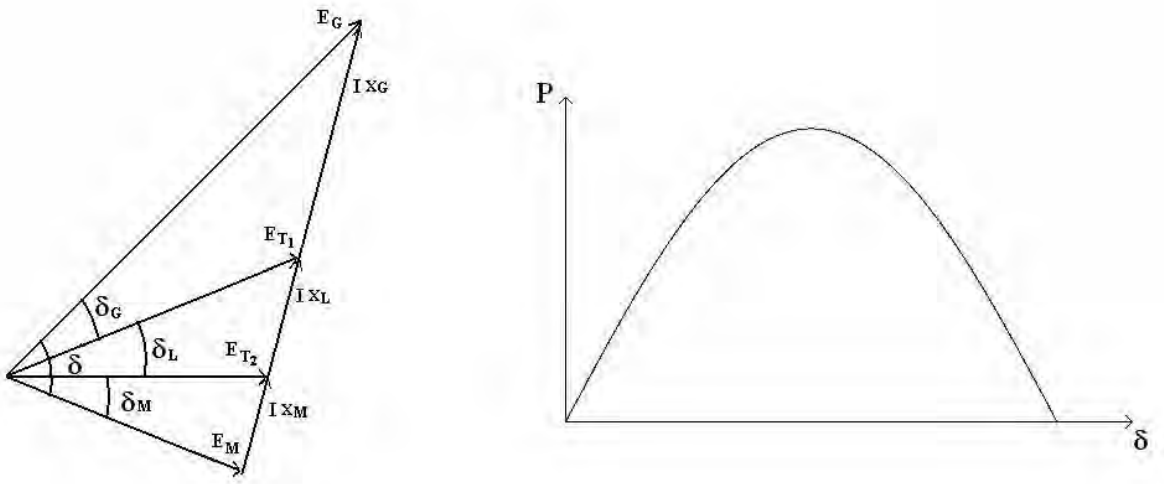


Figura 8 – Potência versus Ângulo.

Sendo: $\delta = \delta_G + \delta_L + \delta_M$ (3.1)

e a transferência de potência do gerador para o motor: $\mathrm{P} = \frac{E_G\, E_M}{X_T} sen\delta$, (3.2)

onde: $X_T = X_G + X_L + X_M$ (3.3)

A partir da Figura 8 se observa que a potência varia com o seno do ângulo formando uma relação não-linear. Com o aumento do ângulo a potência de transferência aumenta até um valor máximo e após certo ângulo (nominalmente 90º) seu crescimento resulta em diminuição da potência transferida. A magnitude da potência máxima é diretamente proporcional as tensões internas da máquina e inversamente proporcional as reatâncias entre as tensões, o que inclui a reatância das máquinas e a reatância da linha de transmissão que as conecta (KUNDUR, 1994).

3.3 A Estabilidade Transitória

Para o entendimento da Estabilidade Transitória, propriamente dita, é importante a compreensão de alguns fenômenos prévios a este conceito. Quando uma carga é conectada a rede, a geração não produz a energia que ela solicita imediatamente. Em um período aproximado de 10^{-3} segundos a carga utiliza a energia armazenada no campo magnético local, sendo atendida pelo próprio circuito elétrico próximo a ela. Este fato pode gerar uma queda de tensão, por exemplo, aquelas comumente observadas em residências próximas a indústrias com motores de grande porte que eventualmente são conectados e desconectados à rede, fenômeno chamado de **transitório eletromagnético**. Após este impacto, há uma resposta mecânica do sistema e a energia passa a ser fornecida pelos geradores, que armazenam energia cinética em si. Em um período aproximado de 10^{-1} segundos quando parte desta energia cinética se perde devido a redução da velocidade das partes girantes em conseqüência do aumento da potência elétrica solicitada, ocorre queda na freqüência da rede, fenômeno este conhecido por **transitório eletromecânico**.

Em se tratando de pequenas perturbações, como variações de cargas nos barramentos, o estudo de estabilidade é conhecido como estabilidade dinâmica. Neste caso as equações do sistema são linearizadas em torno de um ponto de operação estável, e o modelo matemático utilizado é um conjunto de equações diferenciais lineares. Quando os distúrbios são grandes, as não-linearidades do sistema não podem ser desprezadas, este estudo passa a ser conhecido como estabilidade transitória e as técnicas matemáticas utilizadas para análise devem levar em conta o conjunto de equações diferenciais não-lineares. Neste caso a preocupação está em manter o sincronismo entre as máquinas após um distúrbio em um curto período de tempo, no qual as ações corretivas dos controladores não causam efeito no comportamento do sistema. Em estudos de controle, classifica-se em três categorias a estabilidade de um sistema não linear: estabilidade local (pequenas perturbações), estabilidade finita e estabilidade global. Se após pequena perturbação o sistema permanece em uma pequena região em torno de um ponto de equilíbrio é considerado localmente estável, já o sistema capaz de retornar ao estado original depois de determinado tempo é considerado assintoticamente estável (COLVARA, 2002).

Assim, cria-se um modelo que define a estabilidade como condição de equilíbrio entre forças que se opõem. Através de forças restauradoras as máquinas interconectadas buscam manter o sincronismo quando existem forças que tendem a acelerar ou desacelerar uma ou mais máquinas com relação a outras. Por exemplo, tem-se de um lado a força representada pela potência mecânica, resultado do movimento da água em uma geração hidráulica, sendo contraposta por uma força que representa a potência elétrica entregue pela máquina ao sistema.

Para melhor compreensão toma-se um sistema de potência operando em regime permanente, onde há equilíbrio entre o torque mecânico na entrada e o torque elétrico na saída

de cada máquina, assim, a velocidade permanece constante. A potência mecânica fornecida aos geradores é exatamente igual à potência elétrica consumida (somada as perdas na transmissão), considerando os termos torque e potência sendo usados sem distinção sendo seus valores por unidade (p.u.) praticamente iguais. Se em um instante qualquer $t = t_0$ ocorrer um grande distúrbio, como um curto-circuito, haverá um desequilíbrio de potência ocasionando um excesso ou déficit de energia nas máquinas, resultando em aceleração ou desaceleração de seus rotores. Com o intuito de restabelecer um novo ponto de equilíbrio, em função da nova condição de transferência de potência e variação de energia, os ângulos das máquinas irão se alterar no tempo.

Se uma máquina, temporariamente, gira mais rapidamente que outra a posição angular do seu rotor relativo ao da outra não será a mesma. A diferença angular resultante transfere parte da carga do gerador lento para o rápido, dependendo da relação potência-ângulo. Este fato tende reduzir a diferença de velocidade e conseqüentemente esta separação angular. Se a perturbação não for muito significativa, o sistema por si só pode encontrar um novo ponto de operação e uma nova configuração de ângulos δ_i que restabelece o balanço de potências. Caso o distúrbio seja grave o sistema pode não encontrar um estado onde ocorra o equilíbrio de potência. A estabilidade do sistema depende de os desvios na posição angular dos rotores resultarem ou não em torques restaurativos e, além disto se estes torques serão suficientes para restabelecer o equilíbrio.

Uma máquina girando a velocidade diferente daquela requerida para gerar tensões na freqüência do sistema acaba por apresentar também flutuações na potência de saída, corrente e tensão, o que pode levar o sistema de proteção a isolá-la das demais. A criação de um outro modelo permite representar a resposta de diversas máquinas em um sistema perante a perda de sincronismo.

A operação síncrona de máquinas interconectadas é análoga a vários carros correndo em uma pista, unidos por elásticos, como visto na Figura 9:

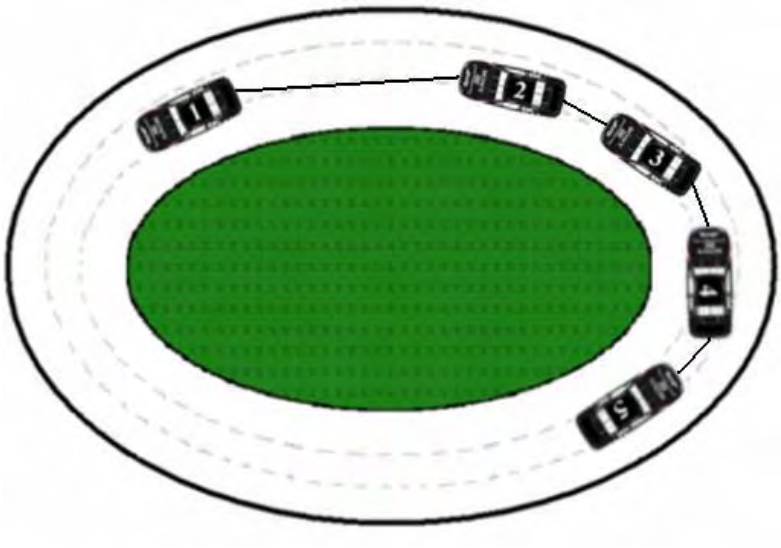


Figura 9 – Pista.

Os carros representam as máquinas síncronas e os elásticos as linhas de transmissão. Quando todos os carros andam com igual velocidade os elásticos não sofrem solicitação, porém, se a força aplicada em um carro aumenta sua velocidade temporariamente, o elástico irá se esticar. Em seguida, o conjunto de forças tende a reduzir o carro mais rápido e acelerar os restantes. Uma cadeia de reações resulta até todos os carros estarem na mesma velocidade novamente. Se a força sobre o elástico exceder seu limite ele irá se romper e um ou mais carros irão se perder dos demais (KUNDUR, 1994).

A perda do sincronismo pode ocorrer entre uma máquina e o resto do sistema ou entre grupos de máquinas. Uma vez não restaurado um estado de equilíbrio é necessário atuar no sistema isolando o defeito ou desconectando algumas cargas, desta forma o sistema passa a possuir uma nova topologia e resta saber se o excesso de energia cinética, adquirido durante a

falta pelos rotores, poderá ser absorvido pelo novo sistema. Esta atuação no sistema deve ser feita em tempo hábil para que se garanta a estabilidade; o tempo máximo que permite esta condição é conhecido como tempo crítico de abertura t_{cr}, e a sua determinação é um dos principais objetivos dos estudos de estabilidade transitória.

3.4 Modelagem Matemática

Para análise da estabilidade é necessária que seja realizada a modelagem matemática, descrevendo o comportamento dinâmico do sistema a ser estudado. O elemento primário fornece potência mecânica à máquina, Figura 10, que é convertida em potência elétrica, e da diferença das duas origina-se a aceleração do rotor. Fisicamente tem-se que o torque aplicado ao rotor corresponde ao momento de inércia "J" multiplicado pela aceleração angular.

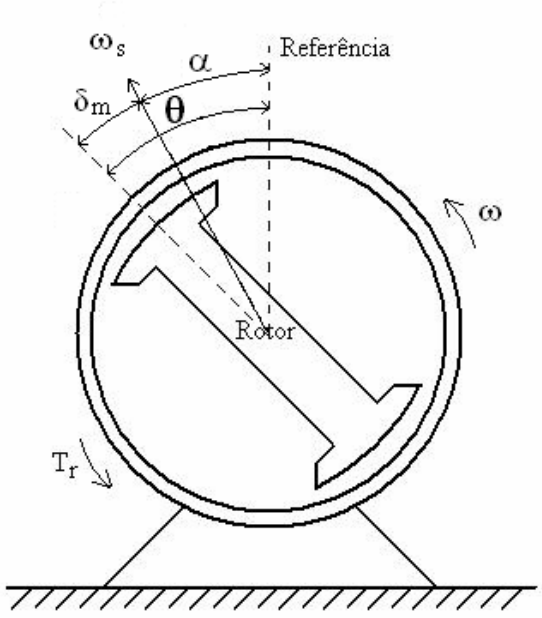


Figura 10 – Máquina Síncrona.

$$J\ddot{\theta} = \mathrm{T}_r \tag{3.4}$$

Onde:

- J - momento de inércia $[Kg\ m^2]$;
- θ - ângulo mecânico do rotor com relação ao eixo de referência; e
- T_r - torque resultante da diferença entre torque mecânico e elétrico, $\mathrm{T}_r = \mathrm{T}_m - \mathrm{T}_e\ [N\ m]$.

Se θ é uma função do tempo, adota-se como referência angular um eixo girando à velocidade síncrona:

$$\theta(t) = (\omega_s t + \alpha) + \delta_m(t) \tag{3.5}$$

Onde:

- $(\omega_s t + \alpha)$ - referência girante à velocidade síncrona;
- α - ângulo de defasagem entre a referência fixa e a referência girante no tempo t = 0; e
- $\delta_m(t)$ - ângulo mecânico formado entre o rotor e a referência girante.

Ao realizar a segunda derivada de $\theta(t)$, tem-se :

$$\dot{\theta}(t) = \omega_s + \dot{\delta}_m(t) = \omega_m \quad \Rightarrow \text{ Velocidade angular mecânica}$$

e $\ddot{\theta}(t) = \ddot{\delta}_m(t)$ $\Rightarrow$ Aceleração angular

Então, conclui-se que independente da referência usada, seja ela fixa ou girante, a aceleração angular é a mesma. Portanto, pode-se escrever:

$$J\ddot{\delta}_m = \mathrm{T}_m - \mathrm{T}_e \tag{3.6}$$

Essa alteração torna-se vantajosa por transformar o problema de soluções de equilíbrio em um problema de pontos de equilíbrio de um conjunto de equações diferenciais. Em vista da facilidade na medição da potência em relação a medição do torque, multiplica-se a equação (3.6) pela velocidade angular ω_m, obtendo-se a equação diferencial agora em função das potências envolvidas:

$$J\omega_m\ddot{\delta}_m = \mathrm{P}_m - \mathrm{P}_e \quad [\mathrm{W}] \tag{3.7}$$

Com a velocidade angular mecânica ω_m considerada em sincronismo com ω_s, simplifica-se em termos de M_m (constante de inércia da máquina):

$$J\omega_m \cong J\omega_s = \mathrm{M}_m \qquad \left[\frac{Kgm^2}{s}\right] \equiv [Js] \equiv [Ws^2]$$

Desta forma, pode-se reescrever a equação (3.7) assim:

$$\mathrm{M}_m \ddot{\delta}_m = \mathrm{P}_m - \mathrm{P}_e \qquad [\mathrm{W}] \tag{3.8}$$

Ao relacionar a velocidade mecânica com a velocidade elétrica em uma máquina de número de pólos (p), tem-se:

$$\omega_e = \frac{p}{2}\omega_m \tag{3.9}$$

E derivando a equação (3.9) no tempo tem-se a mesma relação para aceleração angular:

$$\ddot{\delta}_e = \frac{p}{2}\ddot{\delta}_m \tag{3.10}$$

Então a partir da equação (3.8), se descreve o comportamento dinâmico da máquina em termos dos ângulos elétricos:

$$\frac{2\mathrm{M}_m}{p}\ddot{\delta}_e = \mathrm{P}_m - \mathrm{P}_e \qquad [\mathrm{W}] \tag{3.11}$$

Em Sistemas Elétricos de Potência a utilização de grandezas p.u., apresenta diversas vantagens, assim, divide-se a equação (3.11) pela potência base S_B e tem-se:

$$\frac{2\mathrm{M}_m}{p\,S_B}\ddot{\delta}_e = \frac{\mathrm{P}_m}{S_B} - \frac{\mathrm{P}_e}{S_B} \tag{3.12}$$

Para efeito de simplificação adota-se $\mathrm{M} = \frac{2\mathrm{M}_m}{p\,S_B}$, como a constante de inércia da máquina, corrigida pelo número de pólos, em p.u. e obtém-se:

$$\mathrm{M}\ddot{\delta} = p_{m_i} - p_{e_i} \qquad i = 1,...,n \tag{3.13}$$

No entanto deve-se ressaltar que neste desenvolvimento as máquinas são consideradas ideais. Ao considerar perdas de energia devido ao atrito, a equação diferencial que descreve o comportamento da máquina será acrescida do efeito de amortecimento:

$$\mathrm{M}\ddot{\delta} + p_{d_i} = p_{m_i} - p_{e_i} \qquad i = 1,...,n \tag{3.14}$$

Se, se considerar as perdas tais como atrito e ventilação proporcionais à velocidade da máquina, pode-se escrever:

$$\mathrm{M}\ddot{\delta} + D\dot{\delta} = p_{m_i} - p_{e_i} \qquad i = 1,...,n \tag{3.15}$$

Onde:

- D_i - constante de amortecimento referente a i-ésima máquina do sistema.

Em um sistema de **n** máquinas, existirá um conjunto de **n** equações diferenciais de segunda ordem, conhecidas na literatura como equações de balanço ou de *swing*. Por vezes, a constante de inércia da máquina fornecida pelos fabricantes é dada em **H**, definida como a razão entre a energia cinética na velocidade síncrona pela potência base. Portanto, deve-se estabelecer a relação entre as constantes H e M :

$$H = \frac{W_K}{S_B}, \qquad \text{tendo que } W_K = \frac{1}{2} J\omega_m{}^2 = \frac{1}{2}\mathrm{M}_m\omega_m, \qquad \text{então } H = \frac{\frac{1}{2}\mathrm{M}_m\omega_m}{S_B}.$$

$$\text{A partir de } \mathrm{M} = \frac{2\mathrm{M}_m}{p\, S_B}, \qquad \text{obtém-se } H = \frac{1}{2}\mathrm{M}\frac{p}{2}\omega_m,$$

$$\text{substituindo } \omega_m \text{ por } \omega_e, \qquad \text{tem-se } H = \mathrm{M}\frac{p}{4}\frac{2}{p}2\pi f_0.$$

$$\text{Logo} \qquad \mathrm{M} = \frac{H}{\pi f_0} \qquad (3.16)$$

3.5 Um Sistema Máquina versus Barra infinita (MBI)

Para o emprego da equação de *swing* é importante, no entanto, observar a existência de três intervalos de tempo conhecidos por: sistema pré-falta, sistema em falta e sistema pós-falta. Em cada intervalo, um novo conjunto de equações diferenciais passa a descrever o

comportamento do sistema, uma vez que a topologia da rede em falta modifica-se em relação àquela em condições normais de operação, assim como, a obtida após a eliminação do defeito. Então, o ponto de equilíbrio do sistema pré-falta é condição inicial para as equações do sistema em falta, e a solução das equações do sistema em falta é condição inicial para as equações pós-falta. Para melhor compreensão da mudança topológica em cada intervalo de tempo, realiza-se a análise de um sistema MBI onde se percebe que a admitância não será a mesma quando operando com duas linhas, em falta e após a abertura de uma das linhas como mostra a Figura 11. Tendo que, por definição o barramento infinito é considerado uma máquina com capacidade de geração ilimitada com inércia infinita, sendo sua velocidade angular constante a referência do sistema. Segundo DA MATA (2005), a partir deste simples sistema, um primeiro estudo de estabilidade transitória já pode ser realizado.

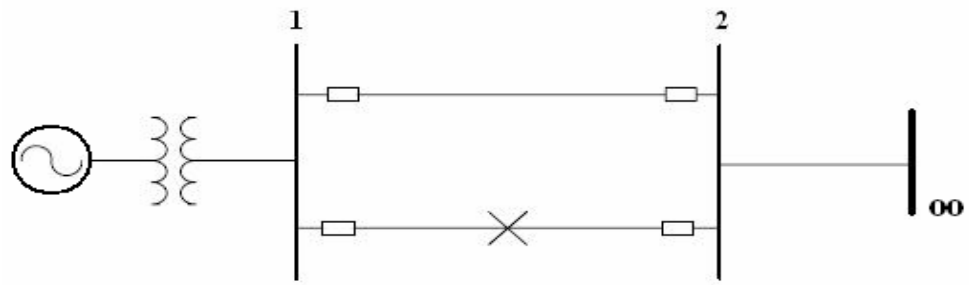


Figura 11 – Sistema MBI.

Em função da admitância a equação que rege a dinâmica do sistema se altera em cada intervalo e no gráfico P x δ, exibido na Figura 12 (COLVARA, 2005b), que relaciona potência e ângulo do gerador, as curvas correspondentes a transferência de potência do sistema em cada uma das condições podem ser observadas.

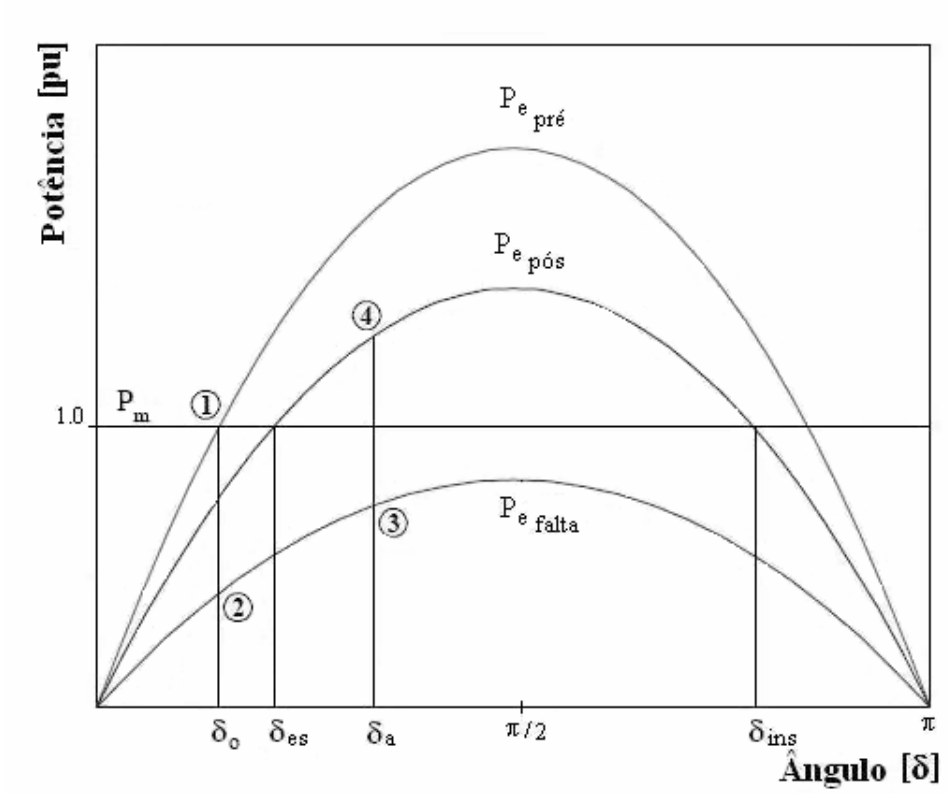


Figura 12 – Curva P x δ.

Na Figura 12 o ponto de operação que antecede a ocorrência da falta é indicado pelo número 1. Nestas condições o equilíbrio é estabelecido porque a potência mecânica da máquina é igual a potência elétrica fornecida ao sistema e o ângulo em que isto ocorre é conhecido por δ_0.

No instante em que ocorre a falta a potência entregue diminui instantaneamente e o novo ponto de operação passa a ser identificado com o número 2. O ângulo do gerador aumenta progressivamente. Nestas condições, percebe-se que a potência mecânica é maior que a potência elétrica, o que resulta em aceleração da máquina. Se o defeito não for eliminado a máquina tende a acelerar indefinidamente, porque neste período a potência elétrica é a todo instante inferior à potência mecânica.

Em um tempo de abertura t_a, ocasião em que o ângulo atinge um valor conhecido por δ_a, o defeito é eliminado com a desconexão de uma das linhas conforme representado na Figura 11. Neste instante, o sistema que operava no ponto indicado pelo número 3 passa para o ponto de operação representado pelo número 4. Nesta situação a potência elétrica encontra-se maior que a potência mecânica, assim, ao contrário do caso anterior o sistema tende a desacelerar. Porém, observa-se que durante a falta a aceleração faz com que o ponto de operação 4 seja atingido com velocidade superior à síncrona o que faz com que o ângulo δ continue aumentando.

Se estabelecido uma nova topologia, pode-se analisar os pontos de equilíbrio do sistema pós-falta, aqui chamados de δ_{es} (estável) e δ_{ins} (instável). Conforme anteriormente, estes pontos são definidos para situação onde a potência mecânica novamente se iguala à potência elétrica. Neste momento, o conceito criado com a analogia do pêndulo é transposto para o caso em estudo e claramente consegue-se compreender a diferença fundamental entre δ_{es} e δ_{ins}. Se o sistema estiver operando em δ_{es} e sofrer alguma perturbação de qualquer natureza que aumente seu ângulo, a potência elétrica torna-se maior que a mecânica, o que resulta em desaceleração do sistema, levando-o de volta ao ponto de equilíbrio. Se esta perturbação reduzir o ângulo, o inverso acontece, a potência mecânica torna-se maior e a aceleração leva o sistema de volta a sua origem. Então, define-se, o conceito final de ponto de equilíbrio **estável** em um sistema de potência.

Se o sistema é considerado no ponto de equilíbrio identificado por δ_{ins}, um distúrbio que ocasione aumento do ângulo tornará a potência elétrica menor que a potência mecânica e a aceleração levará o sistema a se afastar indefinidamente deste ponto de operação. Se o distúrbio reduzir o ângulo, a potência elétrica torna-se maior e a desaceleração faz com que o

sistema também se afaste indefinidamente de δ_{ins}, tem-se aqui um ponto de equilíbrio **instável**.

Conforme mencionado, ao atingir o ponto 4 o sistema possuía velocidade superior à síncrona. Espera-se que o efeito de desaceleração consiga levar a máquina a velocidade síncrona antes que δ_{ins} seja atingido, caso contrário, a potência mecânica se tornará maior que a elétrica, fato que traria aceleração ao sistema e seu afastamento definitivo do ponto de equilíbrio. Se a máquina atingir a velocidade síncrona com um ângulo inferior a δ_{ins} o sistema continuará desacelerando-se , pois a potência elétrica mantém-se maior que a mecânica. Ao atingir δ_{es} a velocidade tornou-se, agora, menor que a síncrona e o ângulo continuará decrescendo a um valor menor que δ_{es}. A potência mecânica novamente torna-se maior e a máquina torna-se a acelerar permanecendo então oscilando em torno do ponto de equilíbrio estável δ_{es}. Desta maneira, pode-se concluir que o ponto de equilíbrio instável δ_{ins} é o ângulo crítico de abertura, ou seja, aquele atingido no tempo limite (crítico) de abertura que garanta a estabilidade do sistema.

3.6 Sistema Multimáquinas

Conforme visto no capítulo anterior, com o avanço do curso modelos mais detalhados devem ser apresentados aos alunos e informações adicionais inseridas para que a construção mental encontre sentido e conexões possam ser estabelecidas entre o conhecimento existente e novas informações.

Anteriormente se analisou uma única máquina conectada a um grande sistema, o qual pode ser considerado como sendo um barramento infinito. Em condições reais, existem várias

máquinas de porte comparável conectadas em um mesmo sistema, onde, esta consideração não pode ser utilizada, aumentando consideravelmente a complexidade do estudo da estabilidade. Baseado na concepção das várias massas suspensas por uma rede de cordões ou dos carros de corrida em uma pista, vimos que componentes interligados exercem influência uns sobre os outros; assim, entende-se que a potência elétrica p_{ei} fornecida pela máquina i, presente na equação (3.15), será função não somente das equações diferenciais dela própria, mas também das equações algébricas da rede e dinâmica das demais máquinas. No modelo clássico de um sistema multimáquinas, no entanto, algumas considerações usadas para o sistema de uma máquina conectada a uma barra infinita podem ser também utilizadas (ANDERSON e FOUAD, 1993):

- Potência mecânica constante;
- A rede operando em regime permanente senoidal;
- A máquina síncrona representada pelo modelo clássico, ou seja, uma fonte de tensão em série com a reatância denominada transitória de eixo direto;
- As cargas consideradas impedâncias constantes; e
- O ângulo do rotor coincide com o ângulo da tensão atrás da reatância transitória.

Esse modelo é útil para análise de estabilidade, mas é limitado ao estudo dos transitórios de primeira oscilação ou para períodos da ordem de aproximadamente um segundo.

Antes, porém, estabelece-se o conceito de multimáquinas. Este sistema, apresentado na Figura 13 (COLVARA, 2005b), é constituído por um conjunto de **n** máquinas que fornecem potência a uma rede de **m** barras.

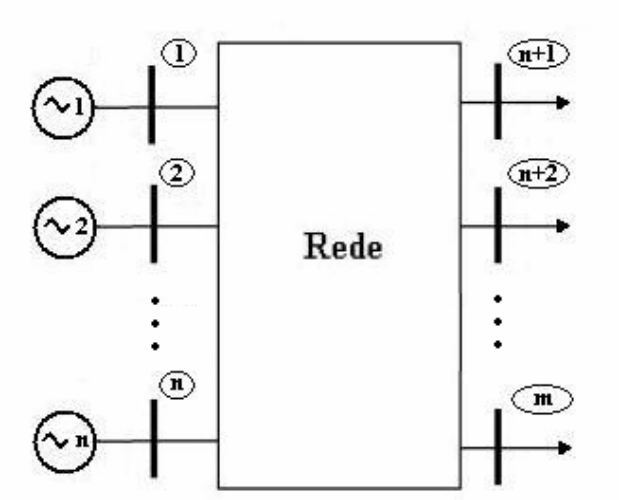


Figura 13 – Sistema Multimáquinas.

As injeções de correntes nas barras são dadas por:

$$I = Y\,V \tag{3.17}$$

Onde:

- I – vetor de injeção de corrente de barra;
- V – vetor de tensões de barra; e
- Y – matriz admitância de barra.

A partir daí pode-se definir a i-ésima injeção de corrente de barra:

$$\dot{I}_i = \sum_{j=1}^{m} \overline{Y}_{ij}\,\dot{V}_j \tag{3.18}$$

Se as cargas de admitância constante são mantidas e adicionando-se à rede as barras internas das máquinas, ter-se-á a rede aumentada conforme a Figura 14 (COLVARA, 2005b):

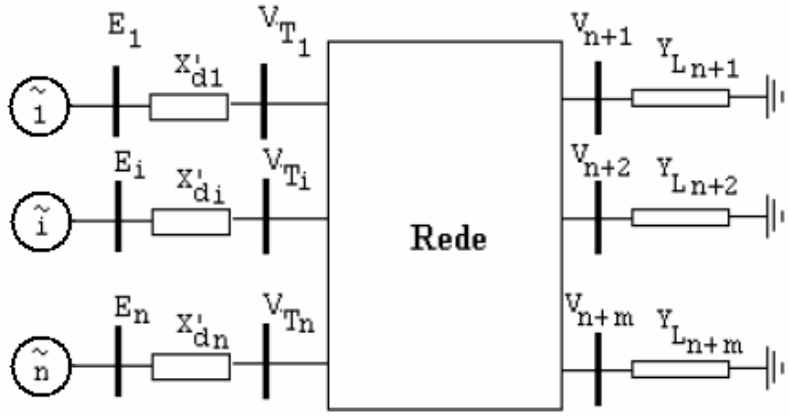


Figura 14 – Sistema Multimáquinas com Barras Internas e Cargas.

Assim, pode-se encontrar a equação nodal da rede aumentada (COLVARA, 2005a):

$$\begin{bmatrix} \dot{I}g_1 \\ \dot{I}g_2 \\ \vdots \\ \dot{I}g_n \\ \hline \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_m \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cccc|ccc} -j\frac{1}{X'd_1} & & & & j\frac{1}{X'd_1} & & \\ & -j\frac{1}{X'd_2} & & & & j\frac{1}{X'd_2} & \\ & & \ddots & & & & \ddots \\ & & & -j\frac{1}{X'd_n} & & & j\frac{1}{X'd_n} \\ \hline j\frac{1}{X'd_1} & & & & Y_{11}-j\frac{1}{X'd_1} & \cdots & Y_{1n} \\ & j\frac{1}{X'd_2} & & & \vdots & \ddots & \vdots \\ & & \ddots & & & & \\ & & & j\frac{1}{X'd_n} & Y_{n1} & \cdots & Y_n-j\frac{1}{X'd_n} \end{array}\right] \cdot \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_n \\ \hline V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_m \end{bmatrix}$$

(3.19)

Se é considerado que as cargas estão incorporadas à rede, as injeções de corrente nas barras de carga são nulas, uma vez que toda corrente que chega pelos elementos da rede à barra de carga atende a carga, ou seja, $\dot{\mathrm{I}}_1 = \dot{\mathrm{I}}_2 = \ldots = \dot{\mathrm{I}}_m = 0$. Se apenas as barras de geração têm injeção de corrente, pode-se escrever a equação da rede aumentada como sendo:

$$\begin{bmatrix} \mathrm{I}_g \\ \hline 0 \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} \mathrm{Y}_{gg} & \mathrm{Y}_{gr} \\ \hline \mathrm{Y}_{rg} & \mathrm{Y}_{rr} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \mathrm{E} \\ \hline V \end{bmatrix} \tag{3.20}$$

Ao particionar a matriz (3.20) e manipular suas submatrizes, tem-se que:

$$\mathrm{I}_g = [\mathrm{Y}_{gg} - \mathrm{Y}_{gr}\ \mathrm{Y}_{rr}^{-1}\ \mathrm{Y}_{rg}]\,\mathrm{E} \qquad \Rightarrow \qquad \mathrm{I}_g = \mathrm{Y}_{red}\ \mathrm{E} \tag{3.21}$$

Se obtidas as expressões das injeções de correntes no sistema reduzido aos nós das forças eletromotrizes, pode-se verificar a injeção do fluxo de potência nestes nós. A potência elétrica fornecida por um gerador genérico **i** é dada por:

$$\dot{S}_i = \dot{\mathrm{E}}_i\ \dot{\mathrm{I}}_{gi}^{*} \tag{3.22}$$

A partir da equação da rede (3.19), tendo-se $\overline{Y}_{ij}$ como a admitância de transferência entre as barras internas das máquinas i e j, nota-se ainda que:

$$\overline{Y}_{ij} = Y_{ij} \angle \theta_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \tag{3.23}$$

Onde:

- G_{ij} - condutância de transferência; e
- B_{ij} - susceptância de transferência.

Se as tensões internas são expressas por $\dot{\mathrm{E}}_i = \mathrm{E}_i \angle \delta_i$, $i = 1,2,\ldots,n$, a potência pode ser escrita como:

$$\dot{S}_i = \mathrm{E}_i \angle \delta_i \sum_{j=1}^{n} \left\{ \left(G_{ij} - jB_{ij} \right) \mathrm{E}_j \angle -\delta_j \right\}$$

ou

$$\dot{S}_i = \mathrm{E}_i^2 \left(G_{ij} - jB_{ij} \right) + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{n} \left\{ \mathrm{E}_i \mathrm{E}_j \left(G_{ij} - jB_{ij} \right) \angle \delta_i - \delta_j \right\} \tag{3.24}$$

$$\dot{S}_i = \mathrm{E}_i^2 \left(G_{ij} - jB_{ij} \right) + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{n} \left\{ \mathrm{E}_i G_{ij} \mathrm{E}_j \cos \delta_{ij} + \mathrm{E}_i B_{ij} \mathrm{E}_j \operatorname{sen} \delta_{ij} + j \left[-\mathrm{E}_i B_{ij} \mathrm{E}_j \cos \delta_{ij} + \mathrm{E}_i G_{ij} \mathrm{E}_j \operatorname{sen} \delta_{ij} \right] \right\}$$

(3.25)

Da expressão (3.25), obtêm-se:

$$\mathrm{P}_{e_i} = R_e \left[\overline{S}_i \right] = G_{ii} \mathrm{E}_i^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{n} \left[\mathrm{E}_i G_{ij} \mathrm{E}_j \cos \delta_{ij} + \mathrm{E}_i B_{ij} \mathrm{E}_j \operatorname{sen} \delta_{ij} \right] \tag{3.26}$$

e

$$Q_{e_i} = I_m\left[\overline{S}_i\right] = -B_{ii}\mathrm{E}_i^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ i\neq j}}^{n} \left[\mathrm{E}_i G_{ij}\mathrm{E}_j \operatorname{sen}\delta_{ij} - \mathrm{E}_i B_{ij}\mathrm{E}_j \cos\delta_{ij}\right] \qquad (3.27)$$

Conforme visto na expressão (3.15), o sistema tem o comportamento dinâmico regido por:

$$\mathrm{M}_i \frac{d^2\delta_i}{dt^2} = \mathrm{P}_{mi} - \mathrm{P}_{ei} - D_i\omega_i \ , \quad i = 1,2,\ldots,n$$

Ou seja:

$$\dot{\delta}_i = \omega_i$$

$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{\mathrm{M}_i}\left[\mathrm{P}_{mi} - \mathrm{P}_{ei} - D_i\omega_i\right], \ i = 1,2,\ldots,n$$

Se as máquinas são consideradas pelo modelo clássico, nenhuma outra dinâmica há de se considerar e o sistema dinâmico é descrito por **2n** equações diferenciais de 1ª ordem, ou seja, há **2n** variáveis de estado que são δ_i, ω_i , $i = 1,2,\ldots,n$.

Uma vez definida a injeção de potência ativa como sendo $\mathrm{P}_i = \mathrm{P}_{mi} - G_{ii}\mathrm{E}_i^2$, obtêm-se as equações dinâmicas do sistema multimáquinas:

$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{\mathrm{M}_i}\left[\mathrm{P}_{mi} - G_{ii}\mathrm{E}_i^2 - \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{n} \left(\mathrm{E}_i B_{ij} \mathrm{E}_j \operatorname{sen}\delta_{ij} + \mathrm{E}_i G_{ij} \mathrm{E}_j \cos\delta_{ij} \right) - D_i \omega_i \right], \quad i = 1,2,\ldots,n \tag{3.28}$$

$$\dot{\delta}_i = \omega_i \tag{3.29}$$

3.7 Estudo de Caso

Nesse trabalho a análise de estabilidade é desenvolvida a partir do modelo clássico para primeira oscilação, com resolução passo-a-passo, empregando-se o método de integração numérica Runge-Kutta de 4ª. ordem.

A partir do equacionamento anteriormente realizado, para melhor compreensão dos sistemas multimáquinas, apresenta-se o estudo de caso do sistema 3 barras, onde os dados das máquinas que compõem o sistema, das linhas de transmissão, das barras e o fluxo de potência na condição pré-falta são ilustrados na Figura 15 adaptada de NAZARENO (2003):

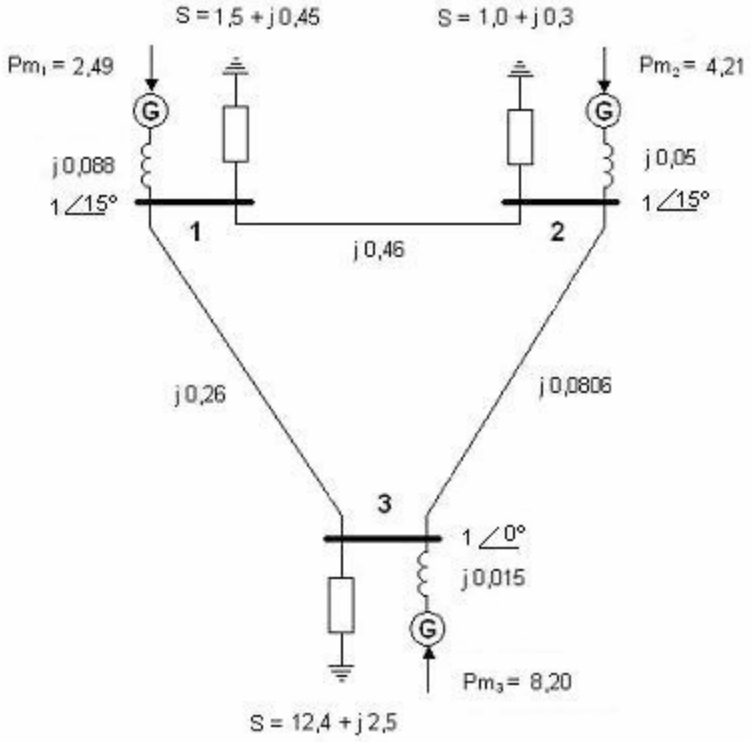


Figura 15 – Sistema 3 barras.

Assim, obtendo o inverso das impedâncias, tem-se a matriz Y_{BUS} do sistema pré-falta:

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} -j6{,}020 & j2{,}174 & j3{,}846 \\ j2{,}174 & -j14{,}581 & j12{,}407 \\ j3{,}846 & j12{,}407 & -j16{,}253 \end{bmatrix}$$

As cargas, representadas por valores p.u., são consideradas como impedâncias constantes, então, utilizando-se a tensão pré-falta da barra calcula-se as admitâncias constantes para as três barras do sistema:

$$\mathrm{Y}_{L1} = \frac{S^*}{|U_1|^2} = \frac{1{,}5 - j0{,}45}{1^2} = 1{,}5 - j0{,}45$$

$$\mathrm{Y}_{L2} = \frac{S^*}{|U_2|^2} = \frac{1{,}0 - j0{,}3}{1^2} = 1{,}0 - j0{,}3$$

$$\mathrm{Y}_{L1} = \frac{S^*}{|U_3|^2} = \frac{12{,}4 - j2{,}5}{1^2} = 12{,}4 - j2{,}5$$

Se adiciona-se à matriz Y_{BUS} as admitâncias constantes, obtém-se:

$$\mathrm{Y}_{BUSL} = \mathrm{Y}_{BUS} + \begin{bmatrix} \mathrm{Y}_{L1} & 0 & 0 \\ 0 & \mathrm{Y}_{L2} & 0 \\ 0 & 0 & \mathrm{Y}_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1{,}5 - j6{,}470) & j2{,}174 & j3{,}846 \\ j2{,}174 & (1{,}0 - j14{,}881) & j12{,}407 \\ j3{,}846 & j12{,}407 & (12{,}4 - j18{,}753) \end{bmatrix}$$

Conforme visto na equação (3.20), pode-se desconsiderar a injeção de corrente nas barras devido às cargas, uma vez que, as mesmas foram adicionadas à matriz admitância. Se a corrente injetada nos barramentos só apresenta a parcela referente aos geradores, a partir da equação (3.18) calcula-se $\dot{\mathrm{I}}_i$ e em seguida a força eletromotriz dos geradores:

$$\dot{\mathrm{I}}_1 = (1{,}5 - j6{,}470)\,1\angle 15^\mathrm{o} + (j2{,}174)\,1\angle 15^\mathrm{o} + (j3{,}846)\,1\angle 0^\mathrm{o} = 2{,}562\angle 1{,}892^\mathrm{o}$$

$$\dot{\mathrm{I}}_2 = (j2{,}174)\,1\angle 15^\mathrm{o} + (1{,}0 - j14{,}881)\,1\angle 15^\mathrm{o} + (j12{,}407)\,1\angle 0^\mathrm{o} = 4{,}273\angle 5{,}261^\mathrm{o}$$

$$\dot{\mathrm{I}}_3 = (j3{,}846)\,1\angle 15^\mathrm{o} + (j12{,}407)\,1\angle 15^\mathrm{o} + (12{,}4 - j18{,}753)\,1\angle 0^\mathrm{o} = 8{,}744\angle -20{,}441^\mathrm{o}$$

$$\dot{E}_{G1} = U_1 + \dot{I}_1\ X'd_1 = 1\angle 15^o + 2{,}562\angle 1{,}892^o\ 0{,}088\angle 90^o = 1{,}073\angle 26{,}80^o$$

$$\dot{E}_{G2} = U_2 + \dot{I}_2\ X'd_2 = 1\angle 15^o + 4{,}273\angle 5{,}261^o\ 0{,}05\angle 90^o = 1{,}057\angle 26{,}49^o$$

$$\dot{E}_{G3} = U_3 + \dot{I}_3\ X'd_3 = 1\angle 0^o + 8{,}744\angle -20{,}441^o\ 0{,}015\angle 90^o = 1{,}053\angle 6{,}70^o$$

Os módulos das tensões nas barras internas dos geradores são mantidos constantes durante toda a análise de estabilidade e os seus respectivos ângulos obtidos no período pré-falta serão as condições iniciais das equações diferenciais do sistema em falta. De acordo com a expressão (3.19), Y_{BUS} pode ser então obtida:

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} -j11{,}36 & 0 & 0 & \vdots & j11{,}36 & 0 & 0 \\ 0 & -j20 & 0 & \vdots & 0 & j20 & 0 \\ 0 & 0 & -j66{,}67 & \vdots & 0 & 0 & j66{,}67 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ j11{,}36 & 0 & 0 & \vdots & (1{,}5 - j17{,}830) & j2{,}174 & j3{,}846 \\ 0 & j20 & 0 & \vdots & j2{,}174 & (1{,}0 - j34{,}881) & j12{,}407 \\ 0 & 0 & j66{,}67 & \vdots & j3{,}846 & j12{,}407 & (12{,}4 - j85{,}423) \end{bmatrix}$$

Depois de identificada a matriz completa do sistema deseja-se analisar sua estabilidade transitória na ocorrência de uma perturbação, um curto-circuito sólido trifásico, neste estudo simulado no trecho 1-2 nas proximidades da barra 2. Admitindo que a falta tenha ocorrido na própria barra, ela é considerada conectada à terra e às linhas que conectam os demais barramentos do sistema à barra 2, consideradas aterradas na extremidade desta barra. Este fato permite algumas simplificações como a eliminação da linha e coluna da matriz que

corresponde ao barramento em falta, dando origem a matriz admitância do sistema em falta conforme a expressão (3.30):

$$Y_{BUS_{falta}} = \begin{bmatrix} -j11{,}36 & 0 & 0 & \vdots & j11{,}36 & 0 \\ 0 & -j20 & 0 & \vdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -j66{,}67 & \vdots & 0 & j66{,}67 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ j11{,}36 & 0 & 0 & \vdots & (1{,}5 - j17{,}830) & j3{,}846 \\ 0 & 0 & j66{,}67 & \vdots & j3{,}846 & (12{,}4 - j85{,}423) \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Através do processo de eliminação de Gauss, baseando-se na equação (3.21) obtém-se a matriz reduzida para o período em falta:

$$Y_{RED_{falta}} = \begin{bmatrix} (0{,}626 - j4{,}107) & 0 & (0{,}435 + j1{,}854) \\ 0 & -j20{,}000 & 0 \\ (0{,}435 + j1{,}854) & 0 & (7{,}579 - j15{,}247) \end{bmatrix}$$

Após eliminada a falta, com abertura do trecho 1-2, define-se a matriz admitância para o período pós-falta:

$$Y_{BUS_{pós-falta}} = \begin{bmatrix} -j11{,}36 & 0 & 0 & \vdots & j11{,}36 & 0 & 0 \\ 0 & -j20 & 0 & \vdots & 0 & j20 & 0 \\ 0 & 0 & -j66{,}67 & \vdots & 0 & 0 & j66{,}67 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ j11{,}36 & 0 & 0 & \vdots & (1{,}5 - j17{,}830) & 0 & j3{,}846 \\ 0 & j20 & 0 & \vdots & 0 & (1{,}0 - j34{,}881) & j12{,}407 \\ 0 & 0 & j66{,}67 & \vdots & j3{,}846 & j12{,}407 & (12{,}4 - j85{,}423) \end{bmatrix}$$

Do mesmo modo, calcula-se a matriz reduzida para o sistema pós-falta:

$$Y_{RED_{pós-falta}} = \begin{bmatrix} (0{,}628 - j4{,}104) & (0{,}057 + j0{,}206) & (0{,}476 + j1{,}948) \\ (0{,}057 + j0{,}206) & (0{,}460 - j7{,}933) & (1{,}071 + j5{,}741) \\ (0{,}476 + j1{,}948) & (1{,}071 + j5.741) & (8{,}497 - j12{,}575) \end{bmatrix}$$

Após o cálculo das matrizes reduzidas do sistema em falta e pós-falta, utilizando a condutância G_{ij} e a susceptância de transferência B_{ij}, vistas na expressão (3.23), podem-se definir os parâmetros C_{ij} e D_{ij} que irão compor as equações diferencias que descrevem o comportamento dinâmico das máquinas:

$$C_{ij} = E_{G_i} E_{G_j} B_{ij} \tag{3.31}$$

$$D_{ij} = E_{G_i} E_{G_j} G_{ij} \tag{3.32}$$

Então, para o sistema em falta, tem-se os seguintes parâmetros conforme a Tabela 3:

Tabela 3 – Parâmetros em falta.

C_{ij}	D_{ij}
$C_{12} = E_{G_1} E_{G_2} B_{12} = 0$	$D_{12} = E_{G_1} E_{G_2} G_{12} = 0$
$C_{13} = E_{G_1} E_{G_3} B_{13} = 1{,}9895$	$D_{13} = E_{G_1} E_{G_3} G_{13} = 0{,}4664$
$C_{21} = C_{12} = 0$	$D_{21} = D_{12} = 0$
$C_{23} = E_{G2} E_{G3} B_{23} = 0$	$D_{23} = E_{G2} E_{G3} G_{23} = 0$
$C_{31} = C_{13} = 1{,}9895$	$D_{31} = D_{13} = 0{,}4664$
$C_{32} = C_{23} = 0$	$D_{32} = D_{23} = 0$

Assim, conforme (3.28) e (3.29) têm-se as equações diferenciais do sistema em falta:

$$0{,}053\dot{\omega}_1 = 2{,}49 - 1{,}073^2 \; x \; 0{,}626 - 0 \; x \; sen(\delta_1 - \delta_2) - 1{,}9895 \; x \; sen(\delta_1 - \delta_3) -$$

$$- 0 \; x \cos(\delta_1 - \delta_2) - 0{,}4664 \; x \cos(\delta_1 - \delta_3)$$

$$\dot{\delta}_1 = \omega_1$$

$$0{,}079\dot{\omega}_2 = 4{,}21 - 1{,}037^2 \; x \; 0 - 0 \; x \; sen(\delta_2 - \delta_1) - 0 \; x \; sen(\delta_2 - \delta_3) -$$

$$- 0 \; x \; \cos(\; \delta \; - \delta_2) - 0 \; x \; \cos(\; \delta_1 - \delta_3)$$

$$\dot{\delta}_2 = \omega_2$$

$$0{,}318\dot{\omega}_3 = 8{,}20 - 0{,}999^2\ x\ 7{,}579 - 1{,}9895\ x\ sen(\delta_3 - \delta_1) - 0\ x\ sen(\delta_3 - \delta_2) -$$

$$- 0{,}4664\ x\ \cos(\delta_3 - \delta_1) - 0\ x\ \cos(\delta_3 - \delta_2)$$

$$\dot{\delta}_3 = \omega_3$$

Para o sistema pós-falta, os parâmetros obtidos são demonstrados na Tabela 4:

Tabela 4 – Parâmetros pós-falta.

C_{ij}	D_{ij}
$C_{12} = E_{G_1} E_{G_2} B_{12} = 0{,}2296$	$D_{12} = E_{G_1} E_{G_2} G_{12} = 0{,}0631$
$C_{13} = E_{G_1} E_{G_3} B_{13} = 2{,}0912$	$D_{13} = E_{G_1} E_{G_3} G_{13} = 0{,}5111$
$C_{21} = C_{12} = 0{,}2296$	$D_{21} = D_{12} = 0{,}0631$
$C_{23} = E_{G2} E_{G3} B_{23} = 5{,}9482$	$D_{23} = E_{G2} E_{G3} G_{23} = 1{,}1099$
$C_{31} = C_{13} = 2{,}0912$	$D_{31} = D_{13} = 0{,}5111$
$C_{32} = C_{23} = 5{,}9482$	$D_{32} = D_{23} = 1{,}1099$

Por fim, obtêm-se as equações diferenciais pós-falta:

$$0{,}053\dot{\omega}_1 = 2{,}49 - 1{,}073^2\ x\ 0{,}628 - 0{,}2296\ x\ sen(\delta_1 - \delta_2) - 2{,}0912\ x\ sen(\delta_1 - \delta_3) -$$

$$- 0{,}0631\ x\ \cos(\delta_1 - \delta_2) - 0{,}5111\ x\ \cos(\delta_1 - \delta_3)$$

$$\dot{\delta}_1 = \omega_1$$

$$0{,}079\dot{\omega}_2 = 4{,}21 - 1{,}037^2\ x\ 0{,}460 - 0{,}2296\ x\ sen(\delta_2 - \delta_1) - 5{,}9482\ x\ sen(\delta_2 - \delta_3) -$$

$$- 0{,}0631\ x\ \cos(\delta_2 - \delta_1) - 1{,}1099\ x\ \cos(\delta_2 - \delta_3)$$

$$\dot{\delta}_2 = \omega_2$$

$$0{,}318\dot{\omega}_3 = 8{,}20 - 0{,}999^2\ x\ 8{,}497 - 2{,}0912\ x\ sen(\delta_3 - \delta_1) - 5{,}9482\ x\ sen(\delta_3 - \delta_2) -$$

$$- 0{,}5111\ x\ \cos(\delta_3 - \delta_1) - 1{,}1099\ x\ \cos(\delta_3 - \delta_2)$$

$$\dot{\delta}_3 = \omega_3$$

Essas equações diferenciais não-lineares não possuem solução analítica, portanto, para analisar a estabilidade deste problema é necessário a aplicação de algum método de integração numérica. Neste programa foi utilizado o método Runge-Kutta de 4ª. Ordem (conforme descrito no Apêndice A e Anexo 3).

Com um passo de integração de 0,01 segundos executa-se o método Runge-Kutta duas vezes. Na primeira execução utiliza-se as equações diferenciais do sistema em falta e define-se como valores iniciais $t = 0$ [s], $\delta = \delta_{pré-falta}$ [rad] e $\omega = 0$ [rad/s]. A quantidade de iterações será definida pela razão entre a duração da falta (ou tempo de abertura) e o passo de integração. As grandezas tempo, ângulo e velocidade são calculadas ponto a ponto para cada uma das máquinas. Os valores finais deste processo são considerados condição inicial para a nova execução onde se aplicam as equações diferenciais pós-falta.

O resultado final da simulação proposta neste estudo de caso, mostra na Figura 16 uma situação em que as máquinas permanecem em sincronismo, o que caracteriza um sistema transitoriamente estável.

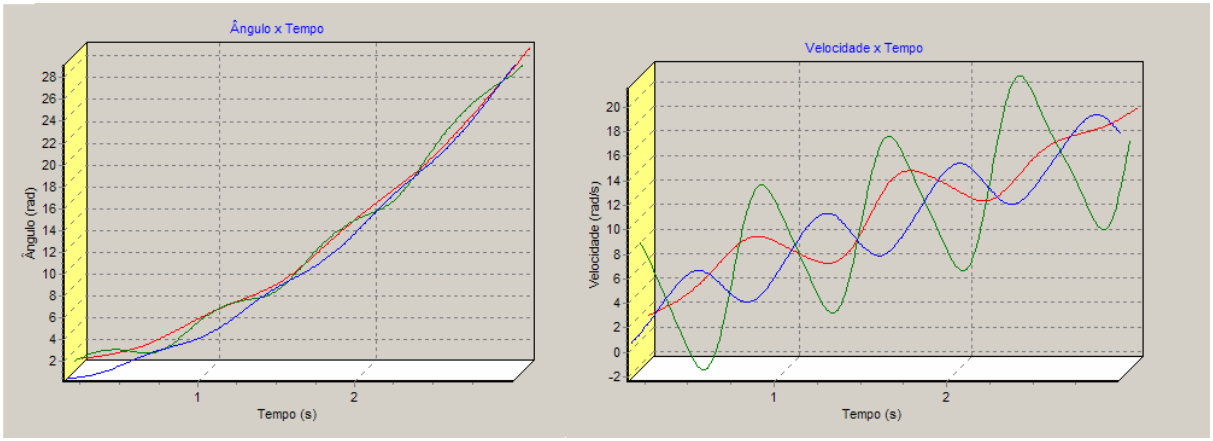


Figura 16 – Sistema transitoriamente estável.

E a Figura 17 representa a simulação em um tempo de abertura tal qual as máquinas perdem o sincronismo, ou seja, o sistema é transitoriamente instável.

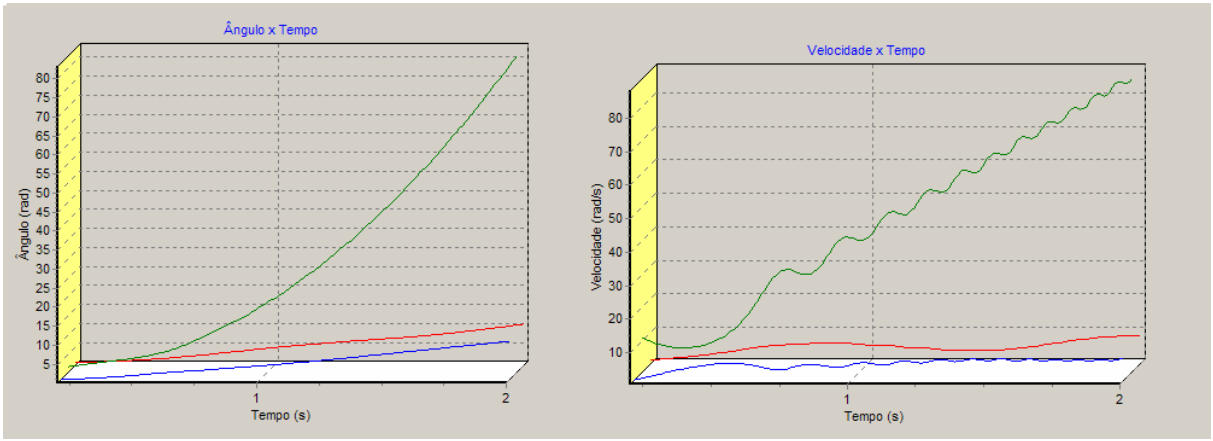


Figura 17 – Sistema transitoriamente instável.

Após algumas simulações, verificou-se que para este estudo de caso o tempo crítico de abertura situa-se entre 0,19 e 0,2 segundos.

CAPÍTULO 4

DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE

O software educativo *Estabilidade Visual* (ou *Visual Stability*), produção final deste trabalho, foi desenvolvido em ambiente gráfico Windows®, tendo todo seu algoritmo implementado na linguagem de programação C++ a partir do compilador **Borland® C++Builder**.

Além de se tratar de uma linguagem de programação de alto nível, ou seja, com um nível de abstração relativamente elevado, longe do código de máquina e mais próximo à linguagem humana, o C++ foi adotado por apresentar algumas características interessantes para esta aplicação:

- Permite alocação dinâmica de memória para manipulação de matrizes genéricas, permitindo ampliação dos sistemas utilizados em trabalhos futuros;
- Trata-se de uma linguagem muito bem estruturada;
- É uma linguagem matemática por excelência;
- Possui excelente portabilidade; e
- É orientada a objetos.

A orientação a objetos trata-se do agrupamento de conjuntos de dados e das rotinas que manipulam estes dados em determinadas estruturas que são denominadas classes.

Nesta característica, em particular, segundo GLIESE (1997) destaca-se ainda uma série de outras vantagens:

- Maior abstração: possibilidade de se concentrar no que um objeto faz antes de sua implementação evitando prender-se a detalhes por antecipação;
- Encapsulamento: impede que o programa seja tão interdependente a ponto de pequenas modificações causarem grandes efeitos de propagação;
- Polimorfismo: permite diversas implementações de uma mesma operação com o mesmo nome;
- Compartilhamento e hierarquia: permite que estrutura e procedimentos comuns sejam aproveitados por classes semelhantes sem redundâncias; e
- Ênfase em objetos e não em procedimentos: maior importância ao que o objeto é e não como ele é utilizado, aumentando a durabilidade e portabilidade do programa.

4.1 Estabilidade Visual

O software desenvolvido permite ao usuário analisar diferentes eventos de estabilidade transitória de sistemas de energia elétrica considerando o modelo clássico para análise de primeira oscilação e disponibiliza três sistemas teste a serem simulados:

- Sistema máquina versus barra infinita (MBI);
- Sistema 3 barras: contendo 3 barras e 3 geradores; e
- Sistema 9 barras: contendo 9 barras e 3 geradores.

A visualização gráfica em três dimensões aliada a dispositivos de animação virtual faz deste aplicativo uma ferramenta de apoio ao ensino extremamente interessante que atende as propostas da construção e interação do conhecimento e a elaboração de modelos sensoriais. A capacidade de alterar as características do sistema criando assim outras configurações e a possibilidade de representar visualmente fenômenos abstratos ou de difícil acesso asseguram esta condição.

A interface amigável oferecida aos usuários, alunos e professores de engenharia, para o ensino e aprendizagem de estabilidade de sistemas pode ser vista na Figura 18, onde na tela principal do programa, via menu, os dados do sistema o qual deseja simular são visualizados.

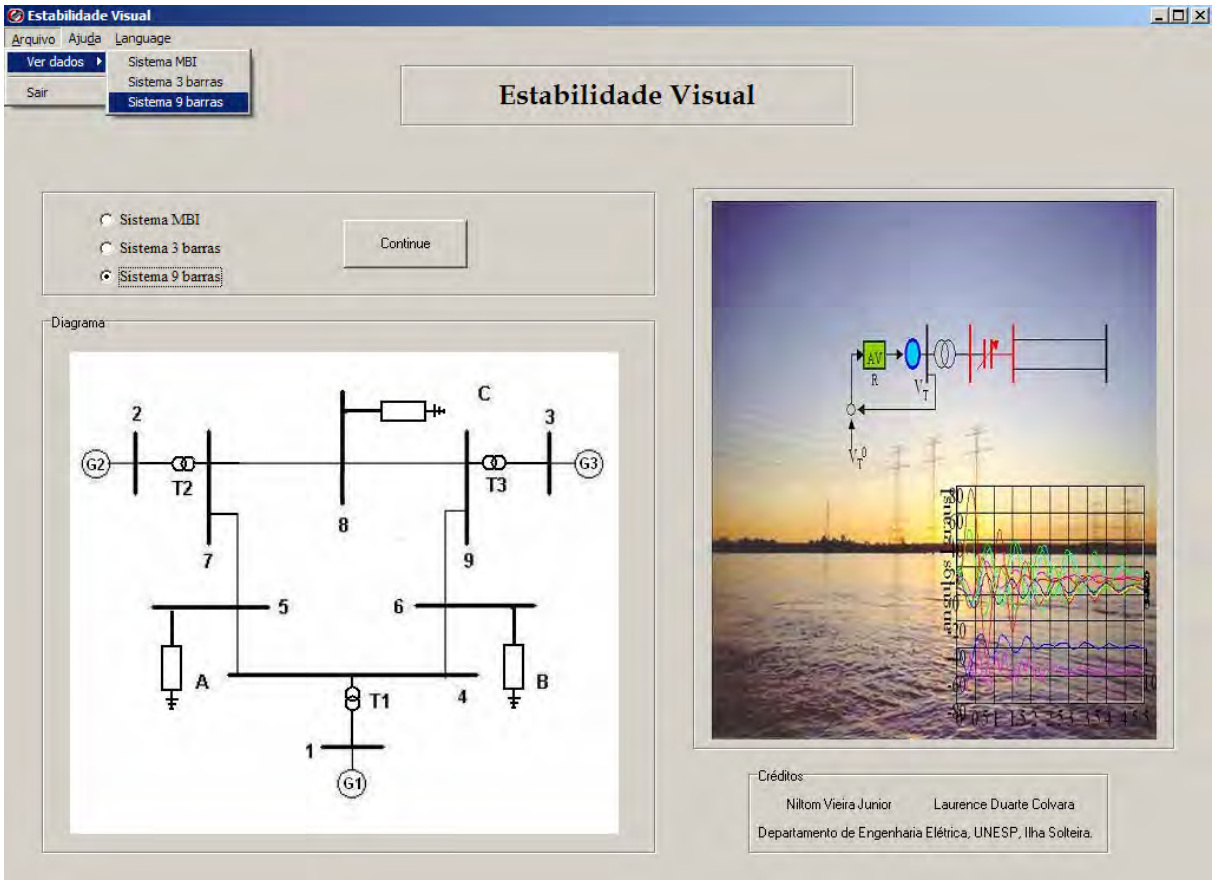


Figura 18 – Dados do sistema.

Além de informações adicionais também é oferecido, conforme mostra a Figura 19, um guia completo do usuário. Este manual desenvolvido em formato *.hlp* (arquivo *help*) contém dicas, formas de utilização e suporte a todo conteúdo teórico (necessário) relacionado aos sistemas elétricos de potência para a compreensão e solução de problemas de estabilidade transitória de sistemas de energia elétrica.

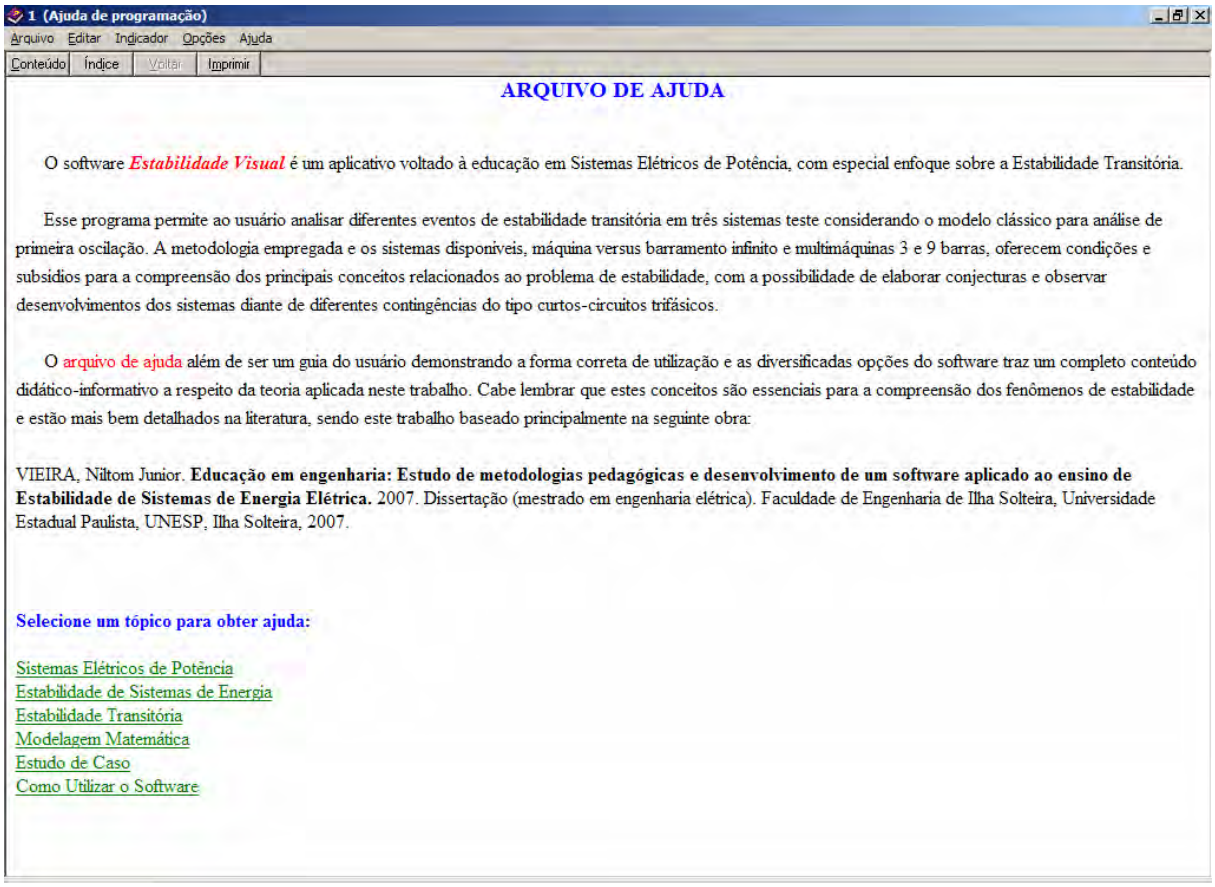


Figura 19 – Arquivo de ajuda.

Ainda na tela principal há um menu com a opção de plataforma bilíngüe, onde toda configuração do software, respostas e demais elementos podem ser exibidos nos idiomas Português ou Inglês de acordo com a Figura 20.

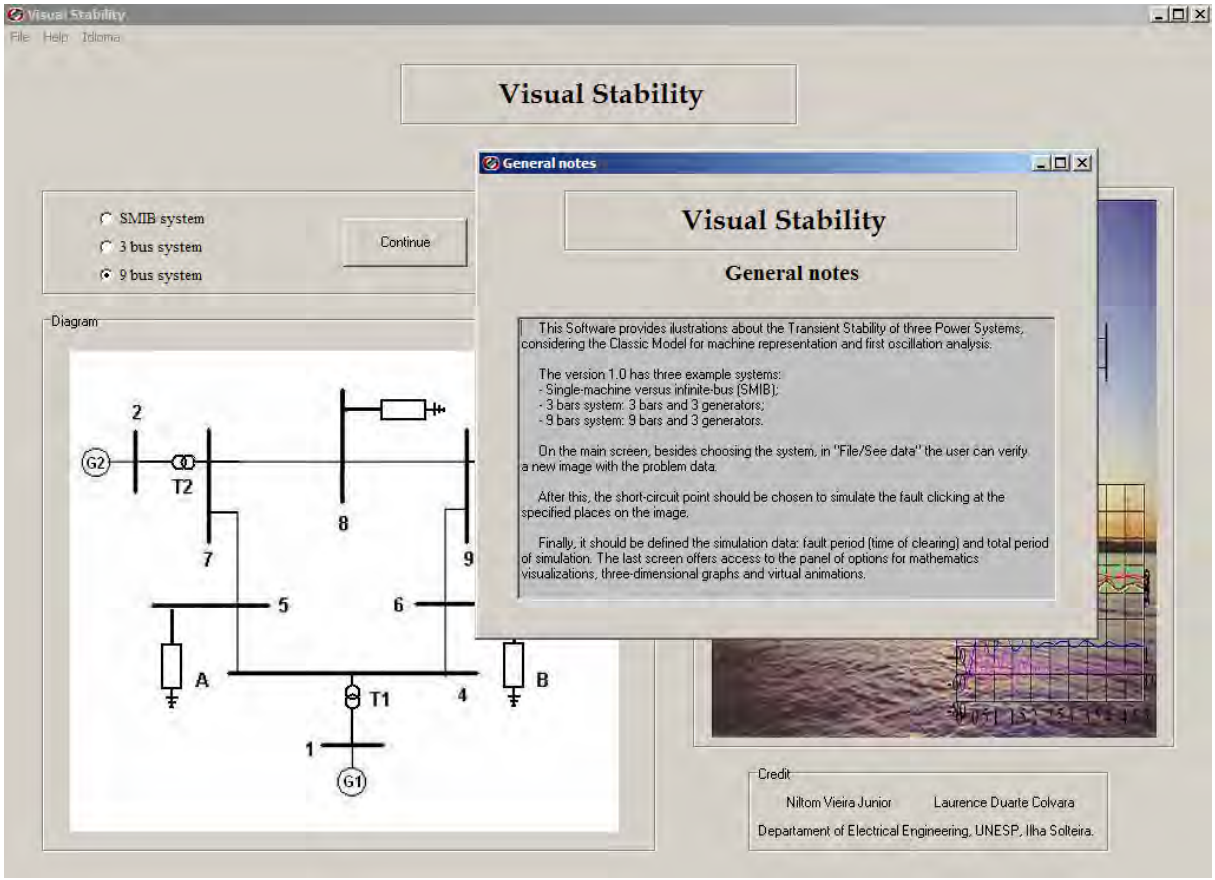


Figura 20 – Plataforma bilíngüe.

Depois de escolhido o sistema desejado, deve-se selecionar um ponto para simular a falta, que se trata de um curto-circuito sólido trifásico. Dados do problema como impedância e reatância de transformador e linha de transmissão podem, também, ser alterados a critério do usuário o que possibilita a criação de diferentes sistemas e a introdução de outros conceitos educacionais como a influência da impedância nas linhas, o emprego de dispositivos FACTS (Flexible A.C. Transmission Systems) ou a adição de linhas paralelas como forma de melhorar a estabilidade do sistema. Um destaque em vermelho é dado ao barramento mais próximo à perturbação e um texto informativo é exibido indicando o trecho da ocorrência conforme visto na Figura 21.

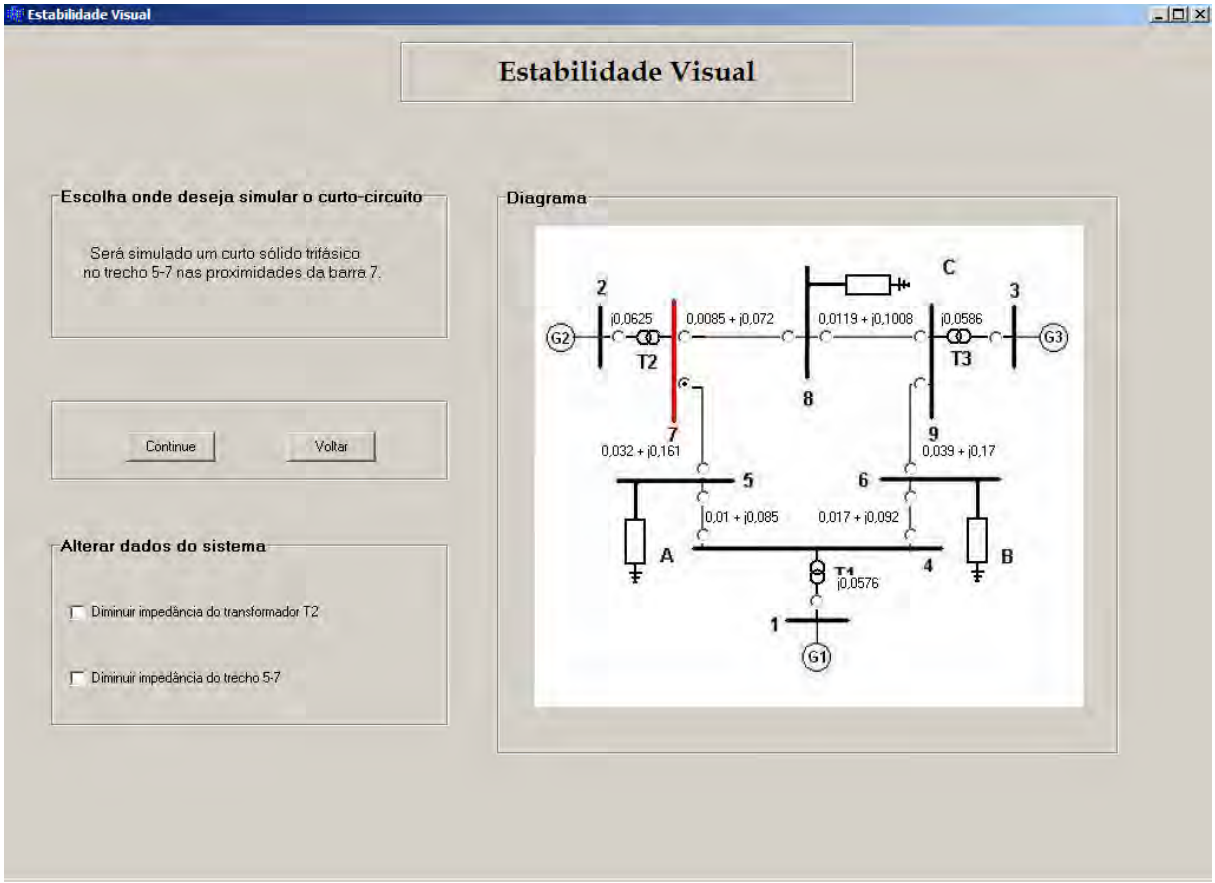


Figura 21 – Trecho em falta.

Por fim definem-se os dados de simulação: duração da falta (tempo de abertura) e tempo final de simulação. A tela exibida na Figura 22 mostra a imagem do sistema simulado e o trecho eliminado. Oferece também acesso ao painel de opções, que permite visualizar as respostas numéricas, os gráficos com controles tridimensionais e as animações virtuais que demonstram o comportamento dinâmico dos rotores das máquinas na ocorrência da perturbação.

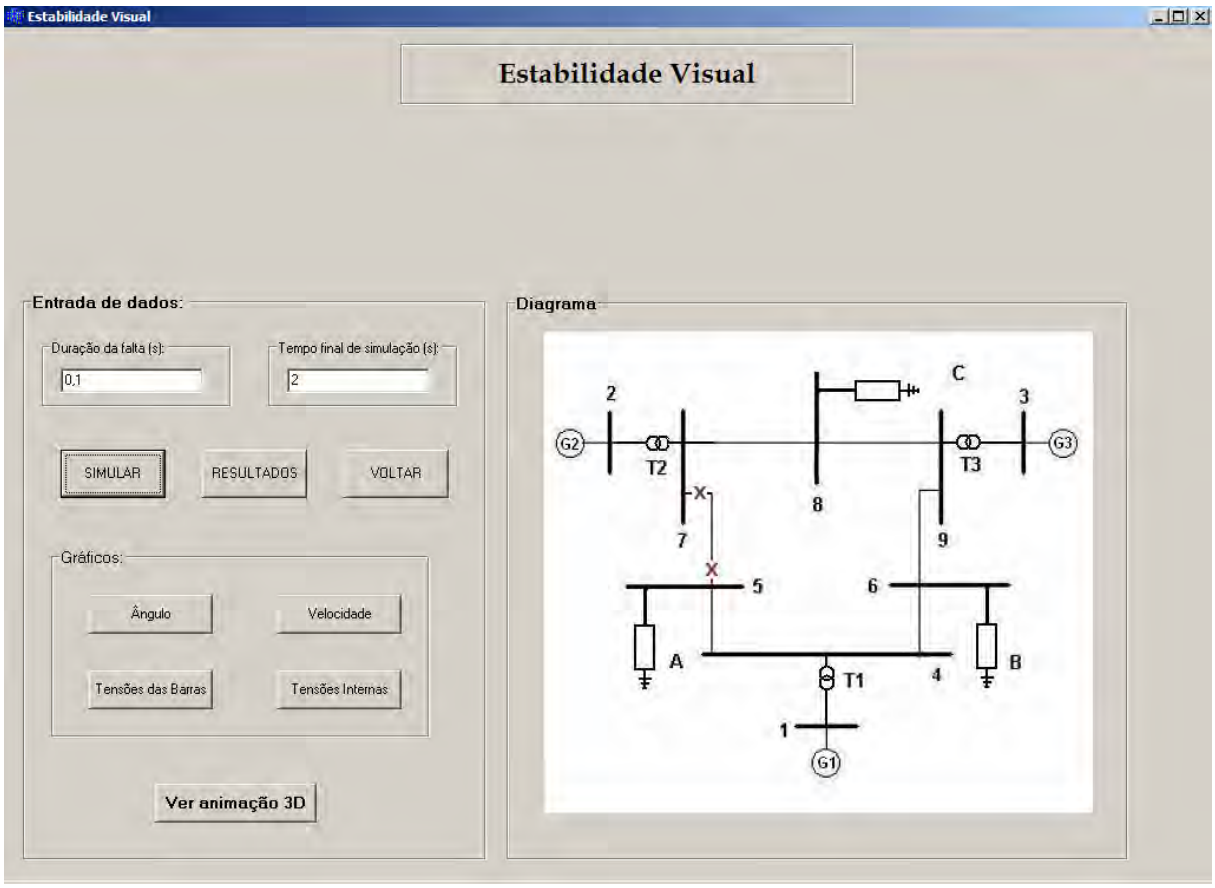


Figura 22 - Dados de simulação.

No painel de opções têm-se acesso a um editor de textos, Figura 23, inicialmente carregado com a resposta numérica do problema e os dados do caso simulado: sistema utilizado, duração da falta, tempo final de simulação, barra curto-circuitada e trecho eliminado. Este editor possui opções de salvar e efetuar alterações no arquivo conforme necessário.

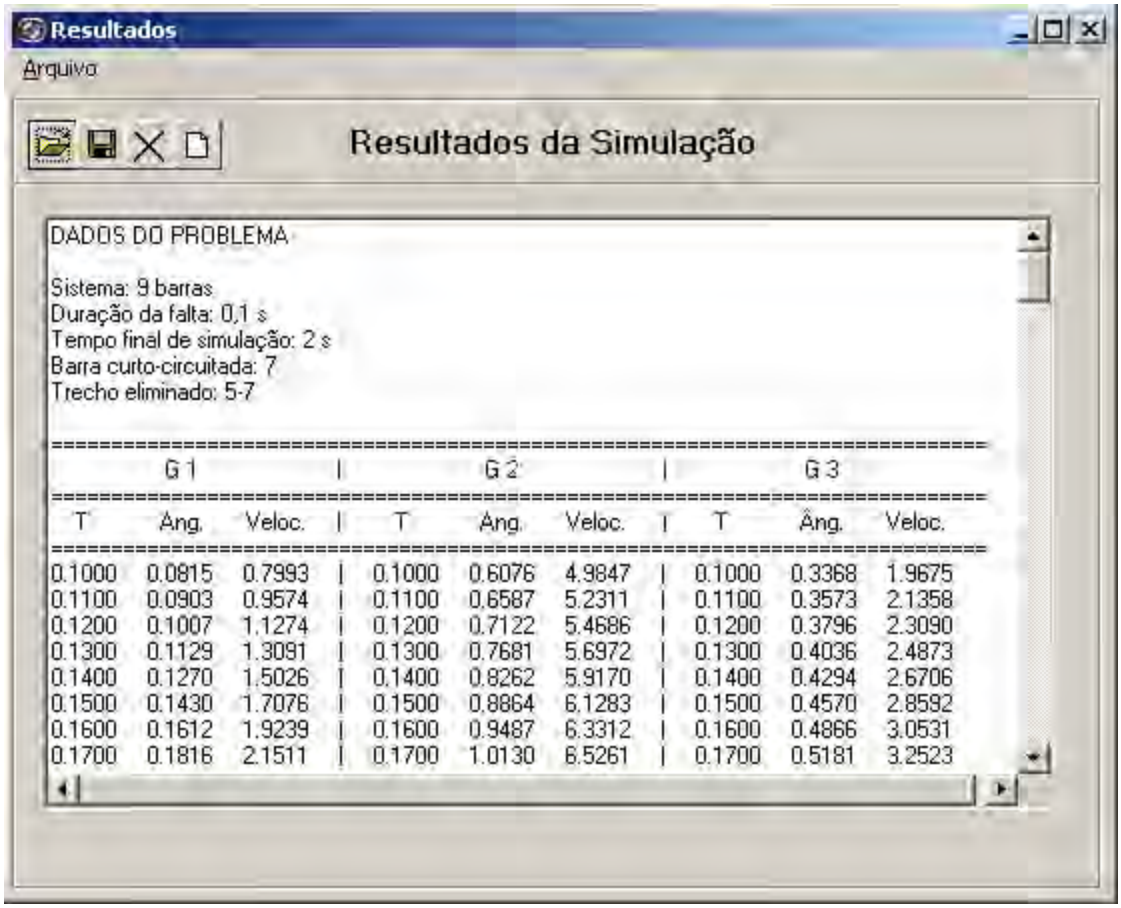


Figura 23 – Editor de textos.

As demais opções acionam as respostas gráficas para ângulo (Figura 24), velocidade (Figura 25), tensões internas dos geradores (Figura 26) e tensões nas barras do sistema (Figura 27), sendo que os gráficos possuem teclas de *zoom,* deslocamento em quatro direções e controle tridimensional (Figura 28), além da possibilidade de salvar a imagem exibida.

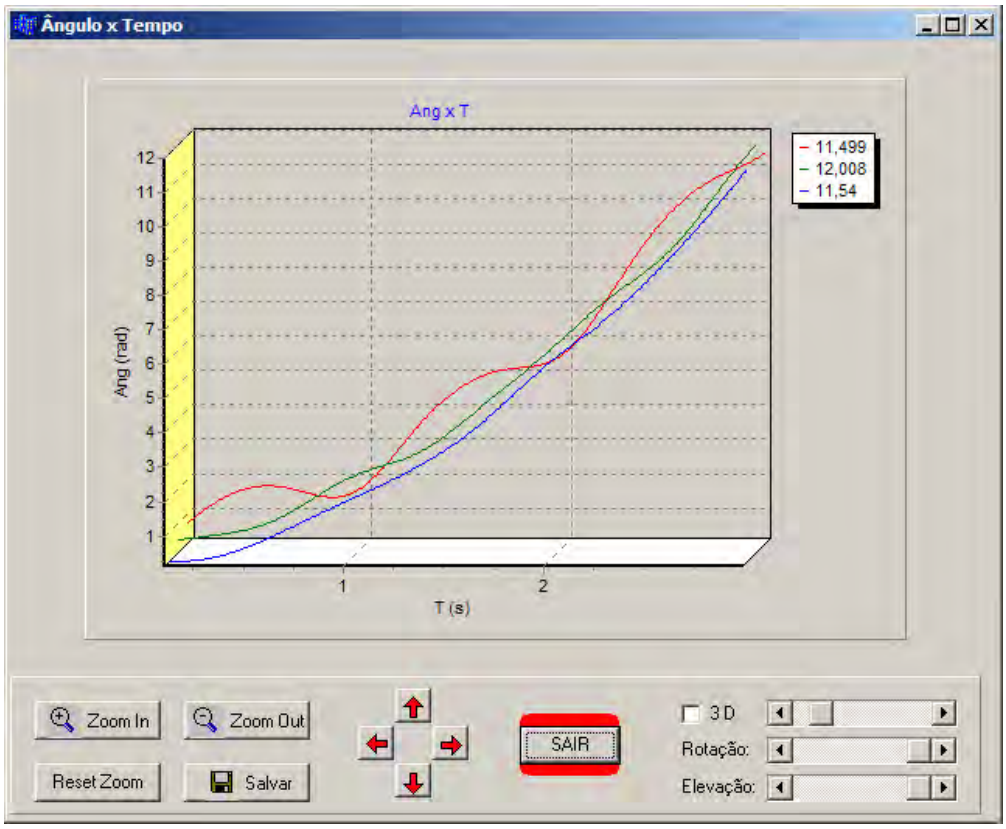


Figura 24 – Ângulo x Tempo.

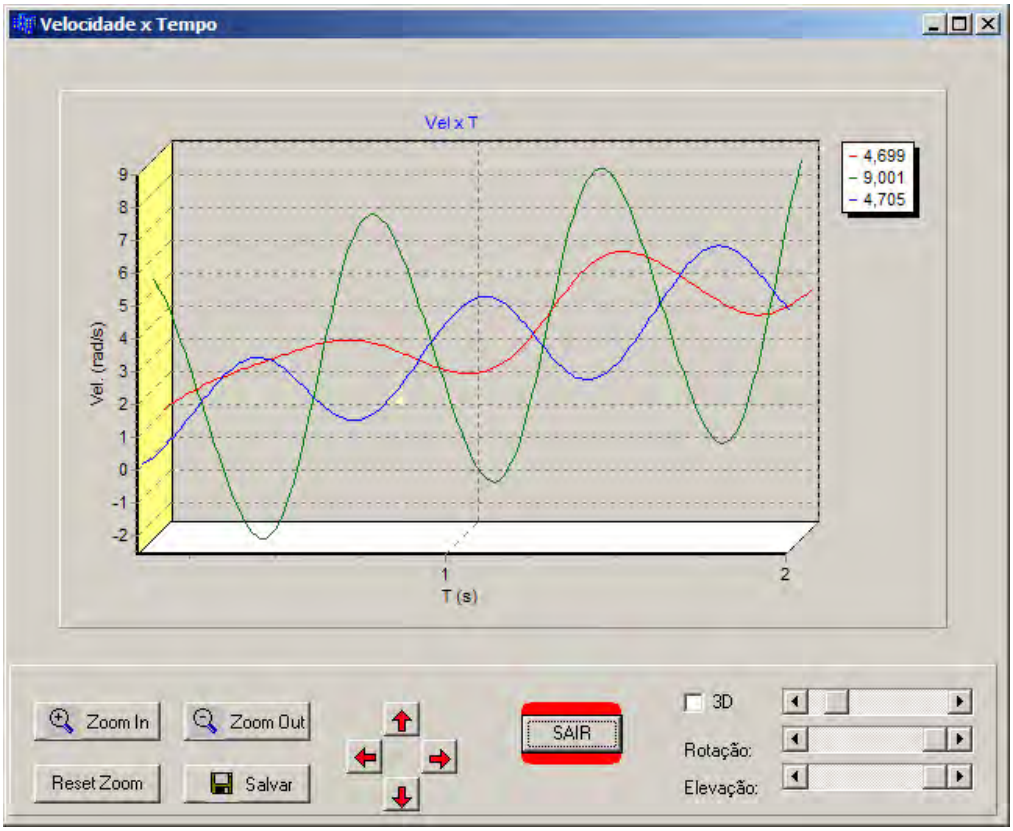


Figura 25 – Velocidade x Tempo.

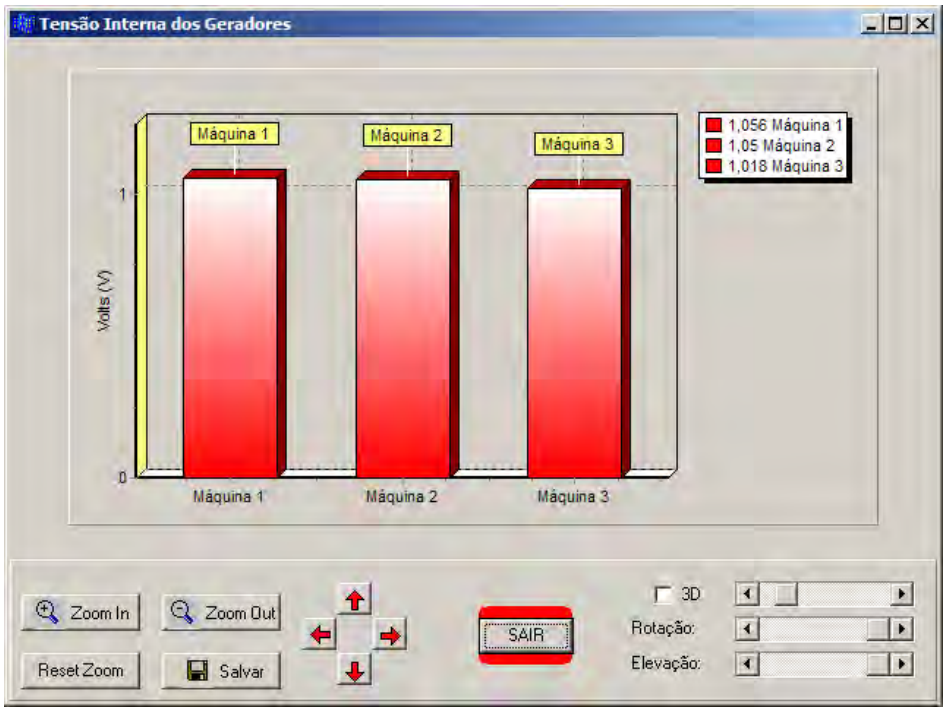


Figura 26 – Tensões internas dos geradores.

No sistema 9 barras o usuário seleciona quais barras deseja analisar (Figura 27):

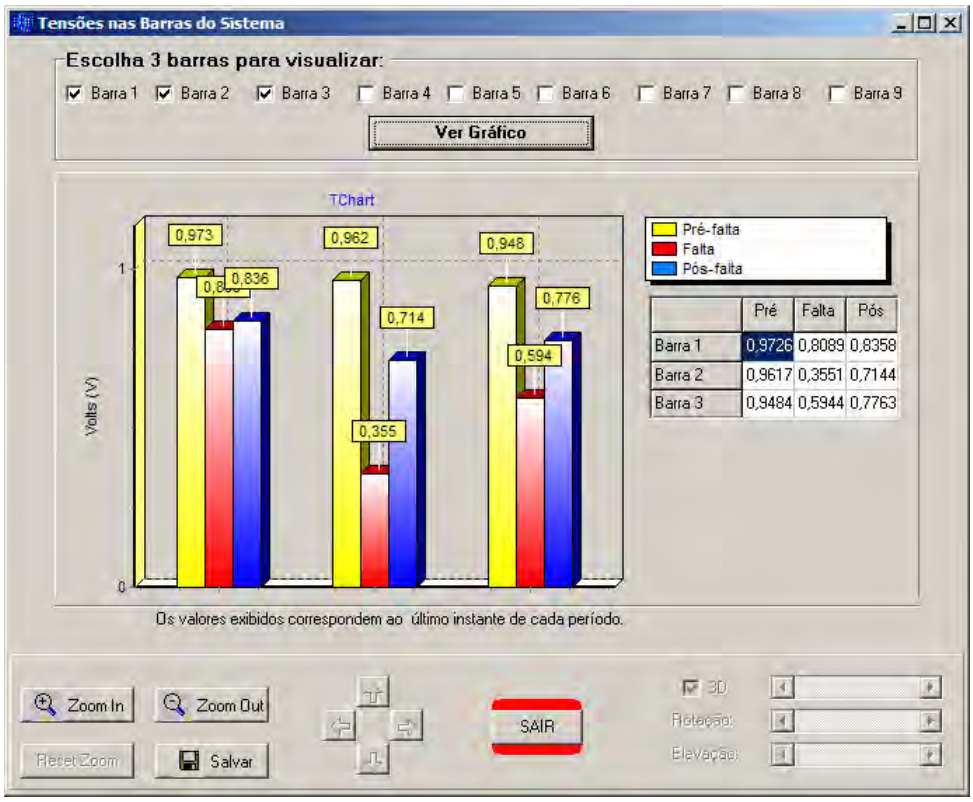


Figura 27 – Tensões nas barras do sistema.

Ao selecionar a opção 3D o usuário habilita a função de controle tridimensional e pode rotacionar ou elevar a imagem nos três eixos visualizando os gráficos da simulação por diversas perspectivas (Figura 28).

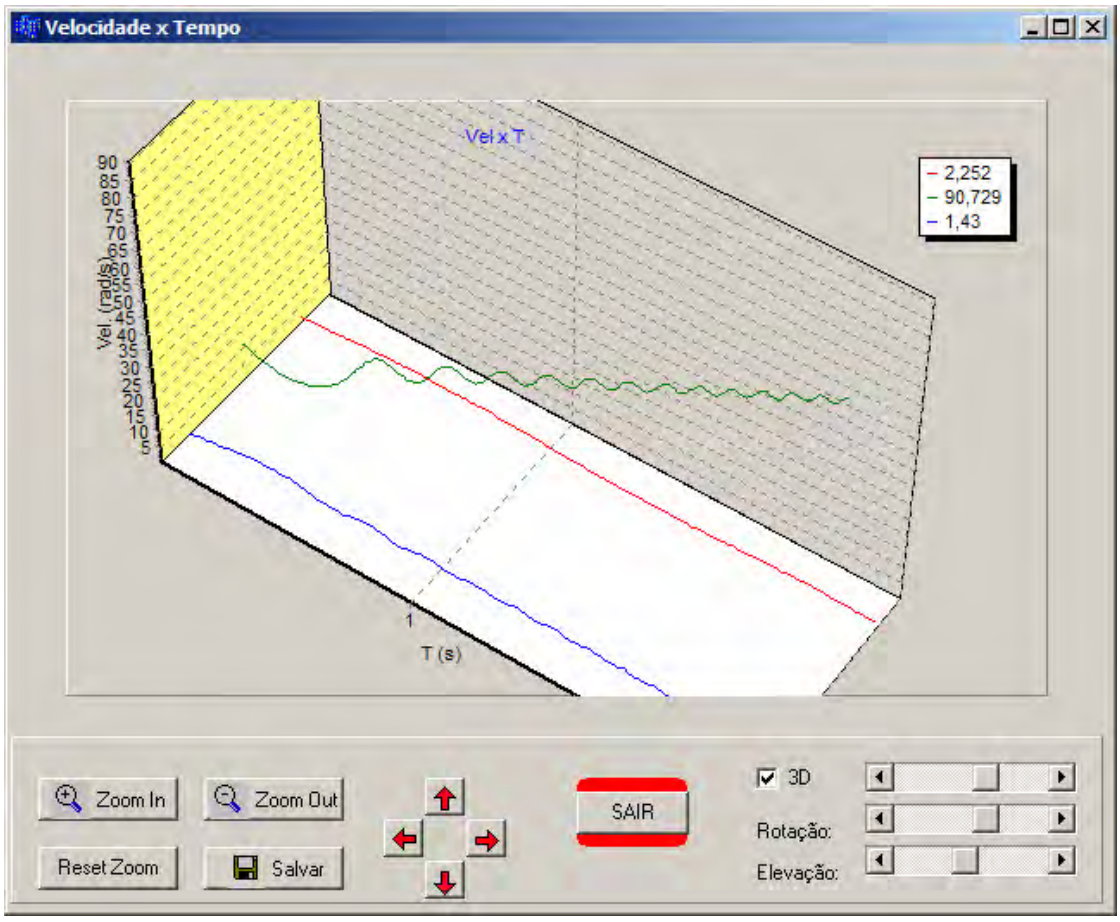


Figura 28 – Controle tridimensional.

Ao acessar a opção “Ver animação” a tela demonstrada na Figura 29 é exibida. Neste momento o usuário executa a animação virtual que, conforme a análise obtida para a estabilidade do sistema selecionado e de acordo com a barra curto-circuitada, o trecho eliminado e o tempo de abertura, mostrará o comportamento dinâmico das máquinas que compõem o sistema. Uma barra com a progressão do tempo acompanha os vídeos que exibem a aceleração do grupo de máquinas no decorrer da falta. Ao final da simulação o *status* indica se houve ou não perda de sincronismo entre os geradores.

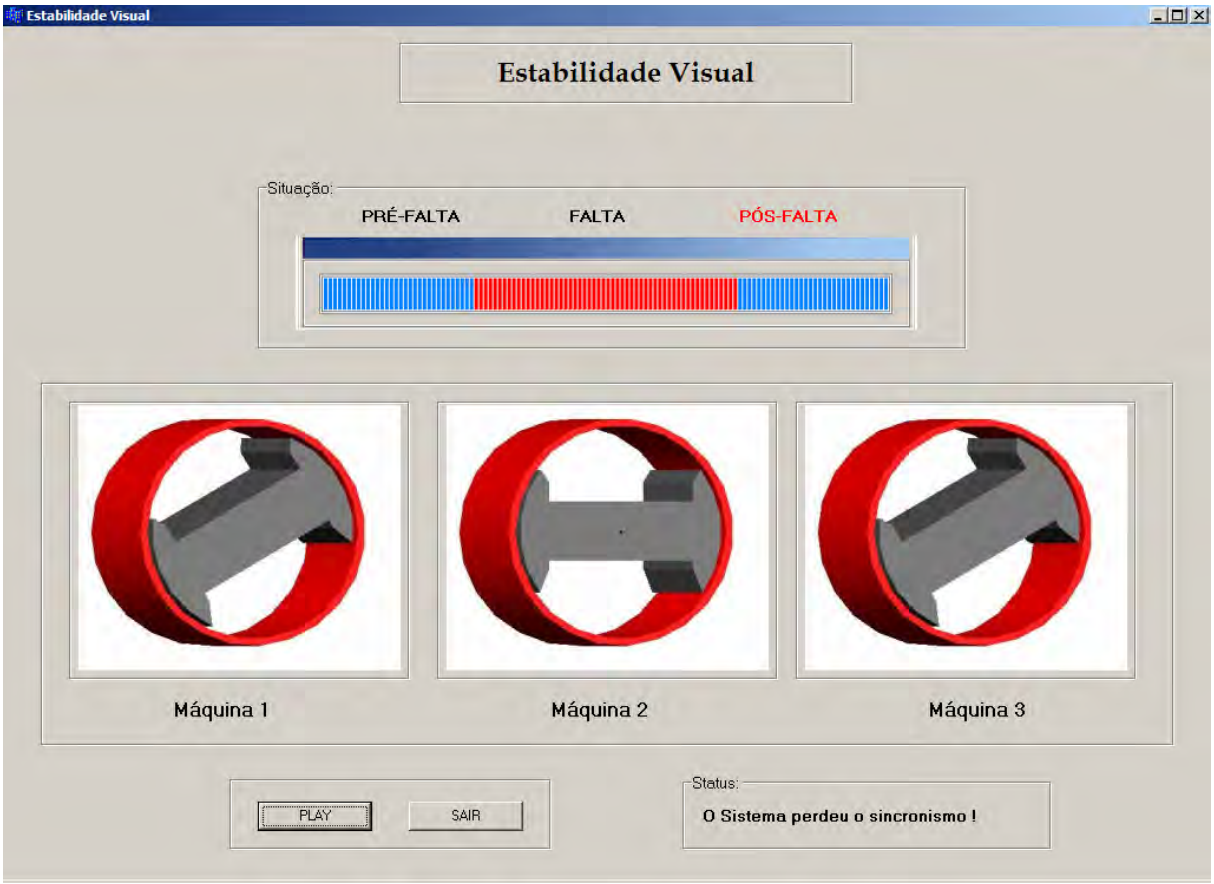


Figura 29 – Comportamento dinâmico do rotor.

CÁPITULO 5

CONCLUSÕES

O dinamismo causado pela globalização seja nos seus impactos tecnológicos ou sociais rompeu barreiras e ocasionou o desenvolvimento exponencial de uma evolução até então linear, requerendo do engenheiro um perfil dotado de flexibilidade de pensamentos e novas habilidades. Faz-se necessário também que os cursos de engenharia incorporem esta realidade e formem cidadãos aptos à nova condição. Para acompanhar este processo as instituições de ensino não devem manter os mesmos paradigmas, precisam moldar-se a formar profissionais hábeis a tomar decisões, lidar com incertezas e possuir aptidões sociais, econômicas, políticas e ambientais.

Uma sólida formação conceitual fortificada em sua base científica torna-se condição necessária para que os cursos de engenharia alcancem o mais alto nível de preparação do indivíduo ao mercado de trabalho.

Para atingir este objetivo e primar pela excelência no ensino, a figura do professor assume grande responsabilidade no processo educacional e deve ser levado a refletir quanto à importância assumida por suas metodologias e postura como mestre.

Conhecer as características individuais dos diversos estilos de alunos; o sentido da aprendizagem, seus aspectos e divergências sob diferentes concepções de ensino; a importância da inovação tecnológica necessária para o estímulo e formação dos alunos que compõem o atual sistema; e os modelos mentais utilizados para compreensão e registro das

informações, oferecem ao professor condições iniciais para um melhor planejamento didático e adequação de diferentes metodologias pedagógicas quando necessário.

O software desenvolvido neste trabalho é considerado singular por possibilitar a alteração dos sistemas propostos e apresentar um conjunto de idéias que envolvem a simulação de sistemas máquina versus barra infinita e sistemas multimáquinas oferecendo recursos virtuais e tridimensionais para compreensão dos resultados.

Esta ferramenta atende as premissas atrativas da carência tecnológica requerida devido a vivência cada vez maior em ambientes dinâmicos; e da necessidade sensorial dos alunos de engenharia aliada com a habilidade humana em aprender a partir de imagens. Deste modo, este trabalho traz a idéia que modelos melhor elaborados podem ser produzidos e utilizados como ferramentas auxiliares pelo professor para que a condução da aprendizagem e o entendimento dos alunos ocorram de forma mais ampla e eficiente.

Em continuação a esta obra é sugerido para trabalhos futuros a ampliação dos sistemas envolvidos e o desenvolvimento de modelos mais complexos que permitam comparações entre os métodos, além de tornar disponível este aplicativo para simulações *on-line* o que viabiliza também o planejamento de um curso a distância nesta área do conhecimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, P. H., FOUAD A. **Power system control and stability**. Ames: Iowa State University Press, 1993.

BECKER, Fernando. O que é construtivismo. **Fundação para o Desenvolvimento da Educação - Série Idéias**, São Paulo, n. 20, 1994. Disponível em: http://www.crmariocovas.sp.gov.br/pdf/ideias_20_p087-093_c.pdf>. Acesso em: 01 set. 2006.

BRETAS, N. G.; ALBERTO, L. F. C. **Estabilidade transitória em sistemas eletroenergéticos**. São Carlos: EESC/USP, 2000.

BORGES, Antonio Tarciso. Como evoluem os modelos mentais. **Ensaio – Pesquisa em Educação em Ciências**, Belo Horizonte, v.1, n.1, set. 1999. Disponível em: <http://www.fae.ufmg.br/ensaio/v1_n1/1_5.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2006.

COLVARA, L. D. (Comp.). **Estabilidade de sistemas de potência: estabilidade dinâmica**. Ilha Solteira: Departamento de Engenharia Elétrica, UNESP, 2002. 44 p.

COLVARA, L. D. (Comp.). **Notas de aula do curso: estabilidade transitória de sistemas de energia elétrica.** Ilha Solteira: Departamento de Engenharia Elétrica, UNESP, 2005. Disciplina do curso de pós-graduação em engenharia elétrica, UNESP, 2005.

COLVARA, L. D. Influência do TCSC na energia transitória dos sistemas de potência. **Revista Del Ieee América Latina**. Rio de Janeiro, v.3, n.3, jul. 2005. Disponível em: < http://www.ewh.ieee.org/reg/9/etrans/vol3issue3July2005/3TLA3_8Colvara.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2006.

COLVARA, L. D. ; SÁ, LUIZ FLÁVIO XAVIER DE. Análogo mecânico para sistema de energia elétrica representado por modelo detalhado com regulador de tensão. 2005. In: CONGRESSO TEMÁTICO DE DINÂMICA, CONTROLE E APLICAÇÕES, 4, 2005, Bauru. **Anais...** Bauru: Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2005.

CORREIA, ANA MAGDA ALENCAR; CHENG, LYANG-YEE. Aprender a ensinar a aprender. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, 28, 2000, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: Associação Brasileira de Ensino de Engenharia, 2000.

DA MATA, Clayton Guimarães. **Uma contribuição na análise da estabilidade transitória dos sistemas elétricos de distribuição na presença de geração distribuída.** 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2005.

ELGERD, O. I. **Introdução a teoria de sistemas de energia elétrica.** São Paulo, Editora MacGraw Hill do Brasil, 1978.

FELDER, Richard M.; SILVERMAN, Linda K. Learning and teaching styles in engineering education. **Journal of Engineering Education**, Whashington, n. 78, v. 7, p.674 – 681, 1988. Disponível em: < http://www.ncsu.edu/felder-public/Papers/LS-1988.pdf>. Acesso em: 04 jan. 2006.

FELDER, Richard M.; SOLOMAN. Barbara A. Index of learning styles questionnaire. **North Carolina State** University, Raleigh. Disponível em: <http://www.engr.ncsu.edu/learningstyles/ilsweb.html>. Acesso em: 04 jan. 2006.

GENTNER, D. and GENTNER, D. R. Flowing or moving crowd: mental models of electricity. 1983. In: BORGES, Antonio Tarciso. Como evoluem os modelos mentais. **Ensaio – Pesquisa em Educação em Ciências**, Belo Horizonte, v. 1, n. 1, set. 1999. Disponível em: <http://www.fae.ufmg.br/ensaio/v1_n1/1_5.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2006.

GIORGETTI, Marcius F.; KURI, Nídia Pavan (org). Estilos de aprendizagem e estratégias. **Departamento de Automação e Sistemas**, Florianópolis, 2006. Disponível em: <www.das.ufsc.br/labsil/como_estudar.html>. Acesso em: 06 jun. 2006.

GLIESE, Roberto. **Simulação do processo CIP e CIL empregando balanço populacional do carregamento de ouro no carvão ativado.** 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

KUNDUR, P. **Power system stability and control**. Electric Power Research Institute, McGraw-Hill, New York, 1994.

LIMA, Renato Vernaschi. **Cenário de integração do processo de desenvolvimento de produtos: uma proposta e treinamento baseado em tecnologia de educação.** 2002. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

MELEIRO, A.; GIORDAN, M. Hipermídia no ensino de modelos atômicos. **Textos LAPEQ – Laboratório de Pesquisa em Ensino de Química e Telemática Educacional**, São Paulo, n. 9, jun. 2003. Disponível em < http://www.lapeq.fe.usp.br/textos/educ/pdf/quimica-multimidia.pdf>. Acesso em: 06 jun. 2006.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO. **Diretrizes curriculares para os cursos de engenharia**. Brasília, 2002. Disponível em <http://portal.mec.gov.br/cne/arquivos/pdf/CES1362.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2006.

NAZARENO, I. S. **Método dinâmico para detecção do PEBS e "SHADOWING METHOD" para cálculo do ponto de equilíbrio de controle em estudos de estabilidade transitória.** 2003. Tese (Dissertação em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Sistema interligado nacional.** Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://www.ons.org.br>. Acesso em: 22 ago. 2006.

OVERBYE, T. J.; SUN, Y. Visualizations for power system contingency analysis data. **IEEE Transactions on Power System.** Ames, v. 19, n. 4, nov. 2004. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/59/29700/01350824.pdf> Acesso em: 12 dez. 2006.

PEREIRA, Márcia de Andrade. **Ensino-aprendizagem em um contexto dinâmico – o caso de planejamento de transportes.** 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SMITH, M. K. David A. Kolb on experimental learning. **The Encyclopedia of Informal Education**, Londres, 2005. Disponível em: <http://www.infed.org/biblio/b-explrn.htm>. Acesso em: 24 abr. 2006.

SOUZA, ANTONIO LOPES DE; OLIVEIRA, JOSÉ CARLOS; VITOR LEMOS MAIA; OLIVEIRA, FABIANO SALOMÃO DE; SANTOS, MARCELO PAULINO DE LIMA. Uma biblioteca VRML para a visualização de campos eletromagnéticos. In: ENCONTRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, 6, 2000, Itaipava. **Anais...** Itaipava: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2000.

VILLATE, Jaime E. Pêndulos e métodos de Runge-Kutta**. Universidade do Porto**, Porto, 2006. Disponível em: < http://fisica.fe.up.pt/eic2107/acetatos/aula11.html>. Acesso em: 22 nov. 2006.

VIEIRA JUNIOR, NILTOM; COLVARA, L. D. A importância do professor conforme estilos de aprendizagem e modelos mentais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, 34, 2006, Passo Fundo. **Anais...** Passo Fundo: Associação Brasileira de Ensino de Engenharia, 2006. p. 1239-1250.

VIEIRA JUNIOR, NILTOM; COLVARA, L. D. O estudo da aprendizagem focado no desenvolvimento de modelos sensitivos. In: ASEE GLOBAL COLLOQUIUM ON ENGINEERING EDUCATION, 5, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: American Society for Engineering Education, 2006. ref. GC 2006-330.

TRABALHOS PUBLICADOS

VIEIRA JUNIOR, NILTOM; COLVARA, L. D. A importância do professor conforme estilos de aprendizagem e modelos mentais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, 34, 2006, Passo Fundo. **Anais...** Passo Fundo: Associação Brasileira de Ensino de Engenharia, 2006. p. 1239-1250.

VIEIRA JUNIOR, NILTOM; COLVARA, L. D. O estudo da aprendizagem focado no desenvolvimento de modelos sensitivos. In: ASEE GLOBAL COLLOQUIUM ON ENGINEERING EDUCATION, 5, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: American Society for Engineering Education, 2006. ref. GC 2006-330.

APÊNDICE A

Código para Resolução do Método Runge-Kutta de 4ª. Ordem

```
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include <stdio.h>
float dy(float, float, float);
float dz(float, float, float);

int main()
{
 float x0, y0, z0, h;
 float k1, k2, k3, k4, l1,l2,l3,l4;
 int m, j;

 printf("Digite o valor do x inicial: \n");
 scanf("%f",&x0);
 printf("Digite o valor do y inicial: \n");
 scanf("%f",&y0);
 printf("Digite o valor do z inicial: \n");
 scanf("%f",&z0);
 printf("Digite o valor do espaçamento h: \n");
 scanf("%f",&h);
 printf("Digite o numero de subintervalos m: \n");
 scanf("%d",&m);

 float *x, *y, *z;
 x = (float*) malloc (m+1 * sizeof(float));   //alocação dinâmica de memória
 y = (float*) malloc (m+1 * sizeof(float));
 z = (float*) malloc (m+1 * sizeof(float));


 x[0] = x0;
 y[0] = y0;
 z[0] = z0;

 for(j=0;j<m;j++)
 {
   k1 = dy(x[j], y[j], z[j]);
   l1 = dz(x[j], y[j], z[j]);

      k2 = dy(x[j]+h/2, y[j]+(h/2*k1), z[j]+(h/2*l1));
      l2 = dz(x[j]+h/2, y[j]+(h/2*k1), z[j]+(h/2*l1));

           k3 = dy(x[j]+h/2, y[j]+(h/2*k2), z[j]+(h/2*l2));
           l3 = dz(x[j]+h/2, y[j]+(h/2*k2), z[j]+(h/2*l2));
```

```
            k4 = dy(x[j]+h, y[j]+h*k3, z[j]+h*l3);
            l4 = dz(x[j]+h, y[j]+h*k3, z[j]+h*l3);


  x[j+1] = x[j] + h;
  y[j+1] = y[j] + (h/6)*(k1 + 2*k2 + 2*k3 + k4);
  z[j+1] = z[j] + (h/6)*(l1 + 2*l2 + 2*l3 + l4);
  }

  printf("Os valores de x, y e z sao:\n");
  for(j=0;j<=m;j++)
  printf("%f, %f, %f; \n",x[j], y[j], z[j]);
  return(0);
}


/******** DECLARAÇÕES DAS FUNÇÕES ********/
float dz(float x, float y, float z)
{
return( 1/M*(Pm – Pe * sin(y) ) );   //M: momento de inércia
}

float dy(float x, float y, float z)
{
return( z );
}
```

ANEXO 1

Índice de Estilos de Aprendizagem (ILS)

Este instrumento investigativo desenvolvido por FELDER e SOLOMAN (2006), tem por objetivo identificar as preferências de aprendizagem através de um questionário composto por 44 questões, sendo 11 direcionadas a cada uma das quatro dimensões já definidas: Percepção, Entrada, Processamento e Entendimento. O ILS pode ser utilizado gratuitamente para propósitos não-comerciais por indivíduos que desejam determinar seu estilo de aprendizagem e por educadores no ensino e pesquisa, podendo também ser respondido eletronicamente via Internet no endereço: http://www.engr.ncsu.edu/learningstyles/ilsweb.html>.

Questionário

Faça um círculo ao redor da letra “a” ou “b” para indicar sua resposta a cada uma das questões. Assinale apenas uma alternativa para cada questão. Se as duas alternativas se aplicam a você, escolha aquela que é mais freqüente.

1. Eu compreendo melhor alguma coisa depois de:
    a. Experimentar.
    b. Refletir sobre ela.

2. Eu me considero:
    a. Realista
    b. Inovador(a)

3. Quando eu penso sobre o que fiz ontem, é mais provável que aflorem:
    a. Figuras
    b. Palavras

4. Eu tendo a:
    a. Compreender os detalhes de um assunto, ms a estrutura geral pode ficar imprecisa.
    b. Compreender a estrutura geral de um assunto, mas os detalhes podem ficar imprecisos.

5. Quando estou aprendendo algum assunto novo, me ajuda:
    a. Falar sobre ele.
    b. Refletir sobre ele.

6. Se eu fosse um professor, eu preferiria ensinar uma disciplina:
    a. Que trate com fatos e situações reais.
    b. Que trate com idéias e teorias.

7. Eu prefiro obter novas informações através de:
    a. Figuras, diagramas, gráficos ou mapas.
    b. Instruções escritas ou informações verbais.

8. Quando eu compreendo:
    a. Todas as partes, consigo entender o todo.
    b. O todo, consigo ver como as partes se encaixam.

9. Em um grupo de estudo, trabalhando um material difícil, eu provavelmente:
    a. Tomo a iniciativa e contribuo com idéias.
    b. Assumo uma posição discreta e escuto.

10. Acho mais fácil:
    a. Aprender fatos.
    b. Aprender conceitos.

11. Em um livro, com uma porção de figuras e desenhos, eu provavelmente:
    a. Observo as figuras e desenhos cuidadosamente.
    b. Atento para o texto escrito.

12. Quando resolvo problemas de matemática, eu:
    a. Usualmente trabalho de maneira a resolver uma etapa de cada vez.
    b. Freqüentemente antevejo as soluções, mas tenho que me esforçar muito para conceber as etapas para chegar a elas.

13. Nas disciplinas que cursei eu:
    a. Em geral fiz amizade com muitos dos colegas.
    b. Raramente fiz amizade com muito dos colegas.

14. Em literatura de não ficção, eu prefiro:
    a. Algo que me ensine fatos novos ou me indique como fazer alguma coisa.
    b. Algo que me apresente novas idéias para pensar.

15. Eu gosto de professores:
    a. Que colocam uma porção de diagramas no quadro.
    b. Que gastam bastante tempo explicando.

16. Quando estou analisando uma estória ou novela eu:
    a. Penso nos incidentes e tento coloca-los junto para identificar os temas.
    b. Tenho consciência dos temas quando termino a leitura e então tenho que voltar atrás para encontrar os incidentes que os confirmem.

17. Quando inicio a resolução de um problema para casa, normalmente eu:
    a. Começo a trabalhar imediatamente na solução.
    b. Primeiro tento compreender completamente o problema.

18. Prefiro a idéia do:
    a. Certo.
    b. Teórico.

19. Relembro melhor:
    a. O que vejo.
    b. O que ouço.

20. É mais importante para mim que o professor:
    a. Apresente a matéria em etapas seqüenciais claras.
    b. Apresente um quadro geral e relacione a matéria com outros assuntos.

21. Eu prefiro estudar:
    a. Em grupo.
    b. Sozinho.

22. Eu costumo ser considerado(a):
    a. Cuidadoso(a) com os detalhes do meu trabalho.
    b. Criativo(a) na maneira de realizar meu trabalho.

23. Quando busco orientação para chegar a um lugar desconhecido, eu prefiro:
    a. Um mapa.
    b. Instruções por escrito.

24. Eu aprendo:
    a. Num ritmo bastante regular. Se estudar pesado, eu "chego" lá.
    b. Em saltos. Fico totalmente confuso(a) por algum tempo, e então, repentinamente eu tenho um "estalo".

25. Eu prefiro primeiro:
    a. Experimentar as coisas.
    b. Pensar sobre como é que eu vou fazer.

26. Quando estou lendo como lazer, eu prefiro escritores que:
    a. Explicitem claramente o que querem dizer.
    b. Dizem as coisas de maneira criativa, interessante.

27. Quando vejo um diagrama ou esquema em uma aula, relembro mais facilmente:
    a. A figura.
    b. O que o professor disse a respeito dela.

28. Quando considero um conjunto de informações, provavelmente eu:
    a. Presto atenção mais nos detalhes e não percebo o quadro geral.
    b. Procuro compreender o quadro geral antes de atentar para os detalhes.

29. Relembro mais facilmente:
    a. Algo que fiz.
    b. Algo sobre o que pensei bastante.

30. Quando tenho uma tarefa para executar, eu prefiro:
    a. Dominar uma maneira para a execução da tarefa.
    b. Encontrar novas maneiras para a execução da tarefa.

31. Quando alguém está me mostrando dados, eu prefiro:
    a. Diagramas ou gráficos.
    b. Texto sumarizando os resultados.

32. Quando escrevo um texto, eu prefiro trabalhar (pensar a respeito ou escrever):
    a. A parte inicial do texto e avançar ordenadamente.
    b. Diferentes partes do texto e ordená-las depois.

33. Quando tenho que trabalhar em um projeto em grupo, eu prefiro que se faça primeiro:
    a. Um debate (*brainstorming*) em grupo, onde todos contribuem com idéias.
    b. Um *brainstorming* individual, seguido de reunião do grupo para comparar as idéias.

34. Considero um elogio chamar alguém de:
    a. Sensível.
    b. Imaginativo.

35. Das pessoas que conheço em uma festa, provavelmente eu me recordo melhor:
    a. Da sua aparência.
    b. Do que elas disseram sobre si mesmas.

36. Quando estou aprendendo um assunto novo, eu prefiro:
    a. Concentrar-me no assunto, aprendendo o máximo possível.
    b. Tentar estabelecer conexões entre o assunto e outros com ele relacionados.

37. Mais provavelmente sou considerado(a):
    a. Expansivo(a)
    b. Reservado(a)

38. Prefiro disciplinas que enfatizam:
    a. Material concreto (fatos, dados).
    b. Material abstrato (conceitos, teorias).

39. Para entretenimento, eu prefiro:
    a. Assistir televisão.
    b. Ler um livro.

40. Alguns professores iniciam suas preleções com um resumo do que irão descobrir. Tais resumos são:
    a. De alguma utilidade para mim.
    b. Muito úteis para mim.

41. A idéia de fazer o trabalho de casa em grupo, com a mesma nota para todos do grupo:
    a. Me agrada.
    b. Não me agrada.

42. Quando estou fazendo cálculos longos:
    a. Tendo a repetir todos os passos e conferir meu trabalho cuidadosamente.
    b. Acho cansativo conferir o meu trabalho e tenho que me esforçar para faze-lo.

43. Tendo a descrever os lugares onde estive:
    a. Com facilidade e com bom detalhamento.
    b. Com dificuldade e sem detalhamento.

44. Quando estou resolvendo problemas em grupo, mais provavelmente eu:
    a. Penso nas etapas do processo de solução.
    b. Penso nas possíveis conseqüências, ou sobre aplicação da solução para uma ampla faixa de áreas.

Instruções

1. Coloque "1" nos espaços apropriados na Tabela abaixo (por exemplo, se você respondeu "a" na questão 3, coloque o "1" na coluna "a" da questão 3).

2. Some as colunas e escreva os totais nos espaços indicados.

3. Para cada uma das quatro escalas, subtraia o total menor do maior. Escreva a diferença (1 a 11) e a letra (a ou b) com o total maior. Por exemplo, se na coluna "ATI/REF" você teve 4 respostas "a" e 7 respostas "b", você escreverá o 4 no campo reservado à soma dos *a's* e o 7 no campo dos *b's*; e *3b* no campo em branco logo baixo (o *3* é resultado da subtração *7* - *4*; e a letra *b* corresponde à coluna que obteve mais respostas).

ATI / REF			**SEN / INT**			**VIS / VER**			**SEQ / GLO**		
Q	a	b	Q	a	b	Q	a	b	Q	a	b
1			2			3			4		
5			6			7			8		
9			10			11			12		
13			14			15			16		
17			18			19			20		
21			22			23			24		
25			26			27			28		
29			30			31			32		
33			34			35			36		
37			38			39			40		
41			42			43			44		

Total (soma *x's* de cada coluna)

ATI / REF			**SEN / INT**			**VIS / VER**			**SEQ / GLO**		
	a	b		a	b		a	b		a	b
(maior – menor) + letra do maior (veja exemplo abaixo)											

* Exemplo: se você totalizou *3* para letra *a* e *8* para a letra *b*, entre com *5b*.

Escalas

Coloque um “X” nos seus escores em cada uma das escalas.

ATI													**REF**
	11a	9a	7a	5a	3a	1a	1b	3b	5b	7b	9b	11b	

SEN													**INT**
	11a	9a	7a	5a	3a	1a	1b	3b	5b	7b	9b	11b	

VIS													**VER**
	11a	9a	7a	5a	3a	1a	1b	3b	5b	7b	9b	11b	

SEQ													**GLO**
	11a	9a	7a	5a	3a	1a	1b	3b	5b	7b	9b	11b	

• Se seu escore na escala está entre 1 e 3: você tem leve preferência entre ambas dimensões da escala.

• Se seu escore na escala é 5 ou 7: você tem uma preferência moderada por uma das dimensões da escala e aprenderá mais facilmente se o ambiente de ensino favorecer esta dimensão.

• Se seu escore na escala é 9 ou 11: você tem uma forte preferência por uma das dimensões da escala. Você pode ter dificuldades de aprendizagem em um ambiente que não favoreça essa preferência.

ANEXO 2

Estilos de Aprendizagem e Estratégias - GIORGETTI e KURI (2006)

APRENDIZES ATIVOS E RELEXIVOS

- Aprendizes ativos tendem a compreender e reter melhor informação trabalhando de modo ativo – discutindo ou aplicando a informação ou explicando-a para outros. Os aprendizes reflexivos preferem primeiro refletir quietamente sobre a informação.

- "Vamos experimentar e ver como funciona" é a frase comum dos aprendizes ativos. "Vamos primeiro meditar sobre o assunto" é resposta dos aprendizes reflexivos.
- Aprendizes ativos tendem a gostar do trabalho em grupo mais do que os reflexivos, que preferem trabalhar sozinhos.
- Assistir aulas sem qualquer atividade participativa, exceto a de tomar notas, é difícil para ambos os tipos de aprendizes, particularmente para os ativos.

Todo mundo é ativo algumas vezes e reflexivo algumas vezes. A sua preferência por uma categoria ou por outra pode ser forte, moderada ou fraca. O equilíbrio das duas é o ideal. Se você agir sempre, antes de refletir, pode fazer as coisas precipitadamente e criar problemas: se você gastar muito tempo refletindo, pode acabar não fazendo nada.

Como os aprendizes ativos podem ajudar a si próprios?

Se você é um aprendiz ativo em uma aula em que se concede pouco ou nenhum tempo para discussão ou para atividades de resolução de problemas, você pode compensar as deficiências quando estudar. Estude com um grupo no qual os membros, um por vez, explicam diferentes tópicos aos outros. Trabalhe com os outros para antever o que lhe será

perguntado no próximo teste e planejar como você responderá. Você certamente reterá melhor a informação se encontrar maneiras de utilizá-la de forma prática.

Como os aprendizes reflexivos podem ajudar a si próprios?

Se você é um aprendiz reflexivo em uma aula em que se concede pouco ou nenhum tempo para pensar sobre uma nova informação, você pode compensar essa deficiência quando estudar. Não fique apenas na leitura ou memorização do material: faça paradas periódicas para revisar o que leu e para pensar em possíveis questões ou aplicações. Você pode descobrir que é útil escrever com suas próprias palavras, pequenos resumos das leituras ou anotações de aula. Isso pode tomar algum tempo, mas lhe permitirá reter o material de maneira mais efetiva.

APENDIZES SENSORIAIS E INTUITIVOS

- Aprendizes sensoriais gostam de aprender fatos, intuitivos preferem descobrir possibilidades e relações.
- Os sensoriais gostam de resolver problemas com métodos estabelecidos, sem complicações e surpresas; intuitivos gostam de novidade e se aborrecem com a repetição. Sensoriais ressentem-se mais do que intuitivos quando são testados sobre um material que não foi coberto explicitamente na aula.

- Sensoriais tendem a ser mais detalhistas e bons para memorizar fatos e fazer trabalho prático (laboratório); intuitivos podem ser melhores no domínio de novos conceitos e sentem-se mais confortáveis do que os sensoriais com abstrações e formulações matemáticas.
- Sensoriais tendem a ser mais práticos e cuidadosos do que os intuitivos; intuitivos são mais rápidos no trabalho e mais inovadores do que os sensoriais.
- Sensoriais não gostam de matérias do tipo "receita", que envolvem muita memorização e cálculos rotineiros.

Todo mundo é sensorial algumas vezes e intuitivo algumas vezes. Sua preferência por uma ou outra categoria pode ser forte, moderada ou fraca. Para ser eficiente como aprendiz e solucionador de problemas, você precisa estar apto para funcionar das duas maneiras. Se enfatizar demasiadamente a intuição, você pode deixar escapar detalhes importantes ou cometer erros por distração nos cálculos ou nos trabalhos práticos; se enfatizar demasiadamente o sensorial, você pode confiar demais na memorização e nos métodos tradicionais e não se concentrar o suficiente para o entendimento e o raciocínio inovador.

Como os aprendizes sensoriais podem ajudar a si próprios?

Sensoriais compreendem e retêm melhor a informação se percebem como ela se relaciona com o mundo real. Se você está em uma aula onde o material é mais abstrato e teórico, você pode ter dificuldade. Peça ao seu professor exemplos específicos dos conceitos e procedimentos e descubra como os conceitos de aplicam na prática. Se o professor não lhe fornecer exemplos suficientes, tente encontrar alguns no livro-texto ou em outras referências, ou ainda, através de discussões com seus amigos ou colegas de classe.

Como os aprendizes intuitivos podem ajudar a si próprios?

Na faculdade, grande parte das aulas expositiva é dirigida aos intuitivos. No entanto, se você é muito intuitivo e está assistindo uma aula que trata principalmente com memorização e aplicação rotineira de fórmulas, você pode se aborrecer. Peça ao seu professor interpretações ou teorias que liguem os fatos, ou tente encontrar as conexões você mesmo. Você pode também estar propenso a cometer erros na prova por ser impaciente com detalhes e não gostar de repetição (como conferir os problemas resolvidos). Dedique tempo suficiente para ler a questão inteira antes de começar a responder e certifique-se de conferir os seus resultados.

APRENDIZES VISUAIS E VERBAIS

Aprendizes visuais relembram melhor o que viram – figuras, diagramas, fluxogramas, filmes e demonstrações. Aprendizes verbais conseguem tirar maior proveito das palavras – explanações escritas ou faladas. Todo mundo aprende melhor quando a informação é apresentada visual e verbalmente.

Na faculdade, a maioria das aulas apresenta pouca informação visual: geralmente, os estudantes ouvem as preleções e lêem o material escrito na lousa, nos livros-texto e nas notas de aula. Infelizmente, a maioria das pessoas é composta por aprendizes visuais, o que quer dizer que para grande parte dos estudantes recebe menos do que poderia se apresentações visuais fossem mais empregadas. Os bons aprendizes são capazes de processar a informação apresentada visual ou verbalmente.

Como os aprendizes visuais podem ajudar a si próprios?

Se você é um aprendiz visual, tente encontrar esboços, esquemas, fotos, fluxogramas ou qualquer outra representação visual do material da disciplina que seja predominantemente verbal. Peça ao professor, consulte livros de referências e verifique se existem vídeos ou CD-ROMs relativos ao material da disciplina. Prepare um mapa conceitual identificando os tópicos principais e colocando-os nos blocos; trace linhas ligando os conceitos e mostrando as conexões. Utilize marcadores de texto e codifique com cores as suas anotações, atribuindo a mesma cor aos itens que se relacionem com o mesmo tópico.

Como os aprendizes verbais podem ajudar a si próprios?

Escreva sumários ou resumos do material da disciplina usando suas próprias palavras. Trabalhar em grupos pode ser particularmente efetivo: você consegue entender melhor o material ouvindo exposições dos seus colegas de classe e aprende ainda mais quando dá as explicações.

APRENDIZES SEQÜENCIAIS E GLOBAIS

- Aprendizes seqüenciais tendem a aprender de forma linear, em etapas logicamente seqüenciadas. Os aprendizes globais tendem a aprender em grandes saltos, assimilando o material quase aleatoriamente, sem ver as conexões, para, então, repentinamente "compreender" tudo.
- Aprendizes seqüenciais tendem a seguir caminhos lógicos para encontrar soluções; os globais podem ser hábeis para resolver problemas complexos com rapidez, ou para juntar as coisas de forma original assim que tenham formado o grande quadro, mas eles podem ter dificuldade para explicarem como fizeram isso.

Muitas pessoas ao lerem esta descrição podem concluir erroneamente que são globais, pois todo mundo já experimentou uma confusão seguida de uma compreensão súbita. O que faz você ser global ou não é o que acontece antes do "estalo". Os aprendizes seqüenciais podem não entender completamente o material, mas eles sempre podem fazer alguma coisa com ele (como resolver os problemas de casa ou passar na prova) desde que as partes que assimilaram estejam conectadas logicamente. Os aprendizes fortemente globais, que carecem de habilidades de raciocínio seqüencial, por outro lado, podem ter sérias dificuldades até que consigam o quadro geral. Mesmo depois que conseguem, eles podem ser imprecisos quanto aos detalhes da matéria, enquanto que os seqüenciais, mesmo conhecendo bastante sobre aspectos específicos de uma matéria, podem ter dificuldades para relacioná-los a diferentes aspectos da mesma matéria ou matérias diferentes.

Como os aprendizes seqüenciais podem ajudar a si próprios?

Nas escolas, a maioria das disciplinas é lecionada de maneira seqüencial. No entanto, se você for um aprendiz seqüencial e tiver um professor que salta de um tópico para outro ou deixa de cobrir algumas etapas, você pode ter dificuldades para acompanhar e relembrar depois. Peça ao professor para dar detalhes adicionais sobre as etapas que deixou de lado ou procure os detalhes você mesmo, consultando referências. Quando você estiver estudando, dedique algum tempo para resumir o material e colocá-lo em ordem lógica. Você também poderá tentar fortalecer suas habilidades de raciocínio global relacionando cada novo tópico

com coisas que você já conhece. Quanto mais você fizer isso, mais profundo será o seu conhecimento sobre a matéria.

Como os aprendizes globais podem ajudar a si próprios?

Se você é um aprendiz global, o reconhecimento de que não é lento nem estúpido, mas, simplesmente funciona de maneira diferente do que seus colegas de classe, pode ajudar muito. Entretanto, aqui vão algumas sugestões que podem ajudá-lo a construir o quadro geral mais rapidamente. Antes de começar a estudar a primeira parte do capítulo de um texto, leia o capítulo inteiro para ter uma visão geral. Fazer isso vai tomar tempo, inicialmente, mas lhe poupará repetidos retornos a tópicos específicos mais tarde. Ao invés de gastar um pouco de tempo em cada assunto, cada dia, você poderá concluir que é mais produtivo absorver-se com cada assunto durante períodos longos. Tente relacionar o assunto com coisas que você conhece, pedindo ajuda ao professor para ver as conexões, ou consultando referências. Acima de tudo, não perca confiança em si mesmo, no devido tempo você compreenderá o novo material de uma vez tendo compreendido como ele se relaciona com outros tópicos e áreas, estará apto para aplicá-lo de forma que os seqüenciadores nem julgariam ser possível.

ANEXO 3

Resolução Numérica de Equações Diferenciais Não-lineares

Uma equação diferencial ordinária tem a forma geral:

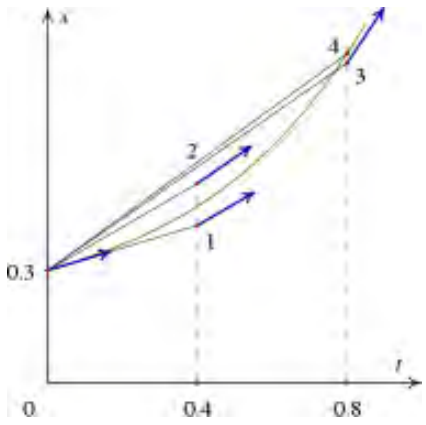
$$F\left(x, y, \frac{dy}{dx}, \frac{d^2y}{dx^2}, \frac{d^3y}{dx^3}, ..., \frac{d^ny}{dx^n}\right) = 0$$

A equação apresentada é chamada de equação diferencial ordinária de *n-ésima* ordem. Ela é uma equação ordinária porque há somente uma variável independente, x. É de *n-ésima* ordem porque a maior derivada é de ordem *n*.

Uma função *y(x)*, *n* vezes diferenciável, satisfazendo a equação anterior é chamada de solução desta equação. As equações diferenciais ordinárias têm várias soluções. É necessário que sejam dadas informações adicionais sobre *y(x)* e/ou sobre suas derivadas em valores específicos de *x* para que ela seja a solução única. Para uma equação diferencial de ordem *n*, normalmente são suficientes *n* condições adicionais para garantir que a solução *y(x)* seja única. Se todas as *n* condições adicionais forem especificadas para um mesmo valor de x, x_0 por exemplo, temos um problema conhecido como Problema do Valor Inicial, PVI. Caso estas *n* condições adicionais sejam dadas para mais de um valor de *x*, temos um problema conhecido como Problema de Valor de Contorno, PVC.

Em geral, é difícil a obtenção de soluções analíticas para equações diferenciais. Na maioria dos casos as soluções devem ser geradas através de métodos numéricos.

No método de Runge-Kutta de ordem 4, o valor médio da derivada no intervalo de tempo *h* calcula-se usando informação em quatro pontos conforme (VILLATE, 2006):



Começa-se por calcular a derivada no ponto inicial do intervalo:

$$d_1 = f(t_0, x_0)$$

a seguir, realiza-se um deslocamento na direção dessa derivada, avançando uma distância $h/2$ no tempo, até um ponto 1 onde é calculado um segundo valor da derivada:

$$d_2 = f(t_0 + h/2, x_0 + (h/2)d_1)$$

Essa derivada é usada para realizar outro deslocamento a partir do ponto inicial, avançando $h/2$ no sentido do tempo, até um outro ponto 2, onde é calculado um terceiro valor da derivada:

$$d_3 = f(t_i + h/2, x_i + (h/2)d_2)$$

seguindo o sentido da derivada $d3$, realiza-se um terceiro deslocamento, a partir do ponto inicial, desta vez avançando h no eixo do tempo, para chegar até um ponto 3, onde se calcula um quarto valor da derivada:

$$d_4 = f(t_i + h, x_i + hd_3)$$

o valor da derivada que conduz a um erro mínimo é a combinação linear:

$$d = \frac{1}{6}(d_1 + 2d_2 + 2d_3 + d_4)$$

admitindo que d é o valor médio da derivada da função x(t) no intervalo h, obtemos:

$$x_{n+1} = x_n + hd$$