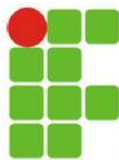


**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
ENGENHARIA ELÉTRICA**

GLEISON SIQUEIRA DE SOUZA

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COMO FERRAMENTA DIDÁTICA PARA O
ENSINO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Palmas
2019**



GLEISON SIQUEIRA DE SOUZA

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COMO FERRAMENTA DIDÁTICA PARA O
ENSINO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica
do Instituto Federal do Tocantins – Campus
Palmas, como exigência à obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Márcio Augusto
Tamashiro

Coorientador: Prof. Me. Kaison Teodoro de
Souza

Palmas

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

- S719s Souza, Gleison Siqueira de
 Simulação computacional como ferramenta didática para o ensino de
 engenharia elétrica / Gleison Siqueira de Souza. – Palmas, TO, 2019.
 90 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) –
 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus
 Palmas, Palmas, TO, 2019.
- Orientador: Dr. Márcio Augusto Tamashiro
 Coorientador: Me. Kaison Teodoro de Souza
1. metodologia de ensino. 2. modelagem. 3. software ATP. I. Tamashiro,
 Márcio Augusto. II. Souza, Kaison Teodoro de. III. Título.

CDD 621

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).



INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
TOCANTINS
Campus Palmas

Ministério da Educação
Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Tocantins- Campus Palmas
Curso Superior de Engenharia Elétrica

ATA DE APRESENTAÇÃO DE TCC

ATA Nº 11/2019 - APRESENTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Aos dezessete dias do mês de dezembro de dois mil e dezenove, às 19h, na sala 906 do Campus Palmas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, reuniu-se a Banca Avaliadora sob a presidência do professor **Dr. Márcio Augusto Tamashiro**, na qualidade de orientador, professor **Me. Kaisson Teodoro de Souza**, na qualidade de coorientador, professor **Me. Jorge Luiz Passos Abduch Dias**, na qualidade de primeiro avaliador e professor **Me. Humberto Rodrigues Macedo**, na qualidade de segundo avaliador, para, em sessão pública, procederem à avaliação do Trabalho de Conclusão de Curso do estudante **GLEISON SIQUEIRA DE SOUZA**, apresentado como requisito parcial para a conclusão do Curso de Engenharia Elétrica, de acordo com a nº 44/2015/CONSUP/IFTO, de 22/09/2015, que regulamenta a Elaboração e a Apresentação de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). O presente TCC tem como título: "**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COMO FERRAMENTA DIDÁTICA PRA O ENSINO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**", desenvolvido sob a orientação do prof. **Dr. Márcio Augusto Tamashiro**. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora, professor **Dr. Márcio Augusto Tamashiro** que fez a apresentação formal dos membros da banca de avaliação. A palavra a seguir foi concedida ao autor do projeto que, em trinta minutos procedeu à apresentação do trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da Banca Avaliadora fez as suas arguições ao autor, tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se à avaliação da defesa do projeto de TCC. Após a avaliação pela banca, considera-se o projeto:

☒ **APROVADO**

☐ **APROVADO COM RESSALVAS***

☐ **REPROVADO**

Após a apresentação, o estudante **GLEISON SIQUEIRA DE SOUZA** obteve a média 8,8.

☐ **Não condicionado à entrega das correções solicitadas pela Banca Avaliadora.**

☐ **Condicionado à entrega das correções solicitadas pela Banca Avaliadora*.**

A conclusão do processo dar-se-á quando da entrega da versão definitiva do projeto, atestada pelo Professor Orientador ao Professor Supervisor de TCC. Cumpridas as formalidades de pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão e, lavrei a presente ata que, depois de lida e aprovada, será assinada pelos membros da Banca Avaliadora em três vias de igual teor.

Prof. Dr. Márcio Augusto Tamashiro
Orientador

Prof. Me. Kaisson Teodoro de Souza
Coorientador

Prof. Me. Jorge Luiz Passos Abduch Dias
Membro da Banca Avaliadora

Prof. Me. Humberto Rodrigues Macedo
Membro da Banca Avaliadora

* Recomenda-se alteração no(s) itens citados pela banca, tendo o(s) estudante(s) o prazo máximo de 15 dias para conclusão do processo com as correções recomendadas para que o TCC seja considerado **APROVADO**.

“Ter tempo para brincar com uma nova ferramenta é um luxo que nem sempre podemos pagar. Mas é preciso perceber que qualquer produto que levou alguns anos para ser preparado precisa de pelo menos algumas horas de exposição a ele para obter toda a imagem”

(Laurent Dubé)

RESUMO

Este trabalho teve como proposta chamar a atenção para o uso da simulação e modelagem computacional como prática de ensino na formação do engenheiro eletricista, no âmbito do Instituto Federal do Tocantins, Campus Palmas, bem como o desenvolvimento de um modelo de transformador capaz de simular ensaios a vazio, de curto-circuito, regulação de tensão e rendimento. A ferramenta utilizada e proposta para esta abordagem foi o software ATP e sua interface gráfica ATPDraw. A necessidade em apresentar o uso da modelagem e simulações computacionais como ferramenta de ensino motivou a realização deste trabalho, tendo em vista que, esse tipo de abordagem não é usual neste meio acadêmico. Por ser um tema trabalhado por autores brasileiros e internacionais, justificou-se fazer um estudo usando o software ATP, para apresentá-lo como um recurso a ser acrescentado na formação do engenheiro eletricista. Foram consultadas literaturas onde a proposta abordada era simulação e modelagem computacional nos cursos de engenharias, e percebeu-se o quanto este assunto é trabalhado. Para implementar o modelo computacional, foram realizados ensaios a vazio e de curto-circuito em um transformador, no laboratório do Campus Palmas. O modelo implementado foi testado para vários dados encontrados em literaturas e para o transformador ensaiado. O modelo computacional se mostrou satisfatório, atendendo aos requisitos aos quais foi submetido, e os resultados comprovam a eficácia do software ATP.

Palavras chave: metodologia de ensino, simulação, modelagem, transformador, software ATP.

ABSTRACT

The purpose of this paper was to draw attention to the use of computer simulation and modeling as an electrical engineer training course at the Federal Institute of Tocantins, Campus Palmas, as well as the development of a transformer model capable of simulating empty tests. short circuit, voltage and yield. One tool used and proposed for this approach was the ATP software and its ATPDraw graphical interface. The need to present or use modeling and computer simulations as a teaching tool motivated this work, considering that this type of approach is not usual in this academic environment. Because it is a theme developed by Brazilian and international authors, just do a study using ATP software, to present as a resource to be added to the training of electrical engineer. Literatures were consulted where a proposal addressed the era of computer simulation and modeling in engineering courses, and realized how much this subject is worked on. To implement the computational model, tests were performed in the short circuit and short circuit in the transformer in the campus lab clap. The implemented model was tested for various data found in literature and for tested transformers. The computational model proved satisfactory, meeting the requirements to which it was submitted and the proven results in the application of the ATP software.

Keywords: teaching methodology, simulation, modeling, transformer, ATP software.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Linhas de comandos do circuito RLC série, arquivo txt	17
Figura 2– Circuito RLC série	18
Figura 3 – Biblioteca do ATPDraw	20
Figura 4 – Estrutura da linguagem MODELS	21
Figura 5 – Janela de criação manual de arquivo de suporte em objects/Model/New sup- file.....	22
Figura 6 – Estrutura DBM	23
Figura 7 - Ferramenta ATP Launcher	24
Figura 8 – Esquema construtivo de transformadores, a) núcleo envolvido, b) núcleo envolvente.....	26
Figura 9 - Transformador ideal	27
Figura 10 - Símbolo esquemático do transformador ideal	28
Figura 11 - Circuito equivalente do transformador real	29
Figura 12 – Curva de magnetização do núcleo do transformador.....	30
Figura 13 – Diagrama de um transformador real.....	31
Figura 14 – Corrente de perdas no núcleo	31
Figura 15 – Relação de tensão, fluxo e corrente de magnetização	32
Figura 16 – Corrente de excitação do transformador.....	32
Figura 17 – Ligações para o ensaio de transformador a vazio ou de circuito aberto.	34
Figura 18 – Circuito equivalente aproximado referido ao primário, considerado para ensaio de curto-circuito	35
Figura 19 - Ligações para o ensaio de transformador em curto-circuito.....	37
Figura 20 - Imagem real do transformador ensaiado	40
Figura 21 – Circuito equivalente do transformador refletido ao lado de baixa tensão ...	40
Figura 22 – Circuito equivalente do transformador rebatido ao lado de baixa tensão ...	41
Figura 23 – Modelo criado na MODELS, a) modelo compacto do bloco, b) estrutura interna do bloco para edição de parâmetros.....	42
Figura 24 - Bloco conectado ao circuito	44
Figura 25 – Circuito equivalente aproximado do transformador modelado	46
Figura 26 – Modelo computacional de transformador monofásico	47
Figura 27 – Transformador modelado, a) modelo compacto do transformador, b) janela de edição dos dados de entrada	48

Figura 28 – Tensão primária, tensão induzida no secundário, tensão nos terminais secundário	55
Figura 29 – Corrente a vazio, corrente ativa do ramo magnetizante, corrente reativa do ramo magnetizante	55
Figura 30 – Potência aparente a vazio, potência ativa a vazio, fator de potência a vazio	56
Figura 31 – Tensão no primário e secundário do transformador para a simulação de curto-circuito.....	57
Figura 32 – Corrente no primário e secundário do transformador para a simulação de curto-circuito.....	58
Figura 33 – Potência aparente, ativa e fator de potência para a simulação de curto-circuito	58
Figura 34 – Tensão primária, tensão induzida no secundário, tensão nos terminais secundário, simulados a partir de dados teóricos.....	60
Figura 35 – Corrente a vazio, corrente ativa do ramo magnetizante, corrente reativa do ramo magnetizante, simulados a partir de dados teóricos	60
Figura 36 – Potência aparente a vazio, potência ativa a vazio, fator de potência a vazio, simulados a partir de dados teóricos	61
Figura 37 – Tensão no primário e secundário do transformador, simuladas a partir de dados teóricos.....	62
Figura 38 – Corrente no primário e secundário do transformador, simuladas a partir de dados teóricos.....	62
Figura 39 – Potência aparente, ativa e fator de potência, simuladas a partir de dados teóricos.....	63
Figura 40 – Tensão induzida e regulação de tensão para carga com fator de potência 1	66
Figura 41 - Tensão induzida e regulação de tensão para carga com fator de potência 0,8 indutivo.....	66
Figura 42 - Tensão induzida e regulação de tensão para carga com fator de potência 0,6 capacitivo.....	67
Figura 43 – Gráficos de potência de entrada e potência de saída e perdas no núcleo para carga nominal.....	68
Figura 44 – Gráfico de rendimento do transformador com carga nominal, fator de potência unitário	69
Figura 45 – Tela inicial do ATPDraw	75
Figura 46 – Abrindo um circuito existente.....	76

Figura 47 – Janela de criação de novo circuito.....	77
Figura 48 – Barra de ferramentas ATPDraw	77
Figura 49 – Lista de componentes disponível no ATP	79
Figura 50 – Aba de componentes modelados disponível no ATPDraw	80
Figura 51 – Componentes do menu Probes & 3-phase	80
Figura 52 – Componentes do menu Branch Linear	81
Figura 53 – Componentes do menu Switches.....	82
Figura 54 – Componentes do menu Sources	83
Figura 55 – Componentes do menu TACS.....	84
Figura 56 – Janela de configuração da fonte AC type 14	85
Figura 57 – Janela de configuração do circuito DC RL série.....	86
Figura 58 – Janela de execução do circuito DC RL série	87
Figura 59 – Janela de variáveis gráficas do circuito DC RL série.....	87
Figura 60 – Gráficos do circuito DC RL série	88

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Problema da pesquisa.....	12
1.2 Justificativa	12
1.3 Objetivos.....	13
1.3.1 Objetivos gerais	13
1.3.2 Objetivos específicos.....	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Simulação e modelagem computacional.....	14
2.2 ATP/ATPDraw	16
2.2.1 Simulação	19
2.2.2 Modelagem	19
2.2.2.1 MODELS.....	20
2.2.2.2 Data modularization	23
2.2.2.3 TACS.....	24
2.3 Transformador	25
2.3.1 Transformadores de potência.....	25
2.3.2 Características construtivas	25
2.3.3 Transformador ideal	26
2.3.4 Transformador real	28
2.3.5 Parâmetros básicos de um transformador	32
2.3.6 Ensaio a vazio.....	33
2.3.7 Ensaio de curto-circuito.....	35
2.3.8 Regulação de tensão e rendimento	37
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	39
3.1 Ensaios em laboratório.....	39
3.2 Modelo computacional	41
3.2.1 Linguagem MODELS	41
3.2.2 TACS.....	44
3.2.3 Modelos de componentes do ATPDraw	45
3.2.4 Transformador modelado	46
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1 Transformador real ensaiado.....	50

4.1.1 Ensaio a vazio	50
4.1.2 Ensaio de curto-circuito.....	51
4.2 Simulação computacional	54
4.2.1 Simulação com os parâmetros reais.....	54
4.2.1.1 Simulação a vazio	54
4.2.1.2 Simulação de curto-circuito.....	57
4.2.2 Simulação com parâmetros teóricos	59
4.2.2.1 Simulação a vazio	60
4.2.2.2 Ensaio de curto-circuito.....	62
4.2.3 Regulação de tensão e rendimento	63
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	70
REFERÊNCIAS	72
APÊNDICE	75

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho teve como proposta apresentar as vantagens do uso da simulação computacional como prática de ensino na formação do engenheiro eletricista no âmbito do Instituto Federal do Tocantins – Campus Palmas (IFTO). Para isso foi modelado um transformador monofásico capaz de simular ensaios a vazio, de curto-circuito, regulação de tensão e rendimento. Esta proposta surgiu com a intenção de explorar e verificar ferramentas computacionais que possam melhorar a qualidade do ensino ofertado aos estudantes de Engenharia Elétrica, de modo a aproximar o futuro profissional das realidades impostas pelo novo mundo globalizado, seja em relação ao mercado de trabalho, como no campo da pesquisa científica.

Como afirma Pereira e Dos Santos Junior (2018, p. 181), “é possível ser engenheiro e atuar no mercado de trabalho, mas também, é possível ser engenheiro pesquisador e atuar no desenvolvimento de pesquisas, atingindo um propósito ainda mais amplo”. Barbosa e Moura (2014, p. 110) afirmam que, “O ensino de Engenharia deve ter como objetivo propiciar uma aprendizagem significativa, contextualizada e orientada para o uso das tecnologias contemporâneas”. As tecnologias aqui propostas são os softwares de simulações e modelagens computacionais, sendo este o enfoque do trabalho, pois estes recursos podem ser usados como ferramentas de ensino.

Para a apresentação do tema, foi proposto o modelamento do transformador, por ser um equipamento bastante utilizado no sistema elétrico e seu estudo em laboratórios ficam restritos a quantidade disponível, as características construtivas e a segurança dos alunos e professores.

Com o advento do transformador, muitos problemas com a transmissão de energia, principalmente à longas distâncias foram solucionadas, tendo em vista que a energia elétrica era gerada e transmitida em corrente contínua (CC), o que impossibilitava o atendimento de cargas distantes dos centros geradores. Atualmente é gerada e transmitida em corrente alternada (CA), e graças aos transformadores, a geração e consumo não necessitam estar em locais tão próximos. (CHAPMAN, 2003).

Transformador é um dispositivo que está presente em todo o sistema elétrico, desde a geração, transmissão e distribuição, sua função básica é converter energia elétrica CA de um nível de tensão para outro, mantendo a frequência e potência. Essa transformação ocorre devido a ação de campos eletromagnéticos que interagem com dois ou mais enrolamentos do transformador, sendo um o primário e o outro o secundário. (UMANS, 2014).

No sistema elétrico de potência, o transformador é um dos dispositivos mais importantes, muitos estudos são realizados afim de melhorar seu rendimento e comportamento diante das variações de tensões e correntes de modo a garantir a integridade do sistema. Uma das grandes dificuldades é o fato dos transformadores trabalharem com altos níveis de corrente e/ou tensão, o que impossibilitam seu estudo em pleno funcionamento, ou seja, inserido no sistema elétrico.

Uma solução para o problema citado acima, é a modelagem computacional, que pode mostrar o comportamento do objeto em questão, e sua resposta a determinados estímulos, dentro de parâmetros previamente ajustados. Existem muitas ferramentas computacionais que possibilitam esse tipo de estudo, porém abordaremos um bem específico, o Programa de Transientes Alternativos, da sigla em inglês ATP.

O ATP é um software que ainda não está inserido no curso de engenharia elétrica do IFTO, enquanto ferramenta de ensino. Sendo assim, este trabalho apresenta o software como um recurso a mais para a melhoria do estudo de fenômenos e equipamentos elétricos. Desta forma, foi realizada a modelagem de um transformador de potência monofásico. Dentro desta modelagem, foi possível levantar os parâmetros de operação a vazio, de curto-circuito, regulação de tensão e eficiência, a partir das impedâncias do circuito equivalente do transformador.

1.1 Problema da pesquisa

O trabalho surgiu da necessidade em apresentar o uso da modelagem e simulações computacionais, como ferramenta de ensino no curso de Engenharia Elétrica, no âmbito do IFTO – Campus Palmas, tendo em vista que, este tipo de abordagem não é usual neste meio acadêmico. Deste modo, em função de sua importância, os transformadores foram selecionados para a aplicação desse recurso tecnológico.

1.2 Justificativa

A instituição deve preparar o aluno, para que, enquanto futuro profissional possa compreender as realidades impostas pelo mundo, os desafios que ele irá enfrentar, onde ele deve ser crítico e criativo dentro das especificidades dos conceitos que envolve a profissão, esse preparo não se resume apenas à exposição oral do conteúdo, mas vai além das abordagens tradicionais de ensino, objetivando a construção de conceitos dentro do tema abordado. O uso

de simulações computacionais nos cursos de engenharia é um tema bastante trabalhado por autores brasileiros e do exterior a muito tempo. Diante dessa realidade, justificou-se fazer um estudo envolvendo a modelagem de um transformador, usando o software ATP, para apresentá-lo como um recurso a ser somado, enquanto ferramenta didática para a apresentação e a análise dos fenômenos que envolvem esse dispositivo elétrico.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos gerais

O objetivo deste trabalho consiste em apresentar o tema simulação e modelagem computacional ao curso de engenharia elétrica, enquanto ferramenta de ensino.

1.3.2 Objetivos específicos

- Conhecer o ATP como ferramenta computacional;
- Pesquisar em livros e periódicos sobre simulação e modelagem computacional;
- Implementar a modelagem de um transformador;
- Realizar ensaios com um transformador real;
- Comparar e analisar os dados resultantes do ensaio com os do modelo computacional;
- Elaborar um tutorial básico de uso do ATP e realizar um minicurso.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Simulação e modelagem computacional

Barbosa e Moura (2014, p. 110) em seu estudo, relata que, “um dos desafios atuais no ensino de Engenharia é conceber e implementar sistemas de ensino capazes de prover uma formação profissional em sintonia com tempos de mudanças tecnológicas cada vez mais intensas e surpreendentes”. Com o avanço tecnológico, o acesso a dispositivos computacionais é uma realidade entre os alunos de engenharia, e de acordo com Moreira et al. (2013), existe a necessidade em pensar em uma metodologia baseada na conceituação do conhecimento, saindo da simples memorização de conteúdo, fazendo uso dos recursos tecnológicos para a exploração de fenômenos, antes abstratos.

Silva e Oliveira (2019, p. 221) fazendo um paralelo com avanço tecnológico afirmam que “não se nota tal avanço nas salas de aula na maioria dos cursos de engenharia do Brasil, principalmente visto os métodos de formação dos engenheiros que concluem os cursos com pouco conhecimento de linguagens de programação e softwares”. Belhot, Figueiredo e Malavé (2001), Bica, Moldovan e Muji (2008), já traziam a necessidade da modelagem e simulação no ensino de engenharia, afirmando que, o objetivo básico da simulação é uma representação de fenômenos reais, onde é visto sua resposta frente a mudanças de variáveis, sendo uma solução para fins didáticos e de pesquisa. Belhot, Figueiredo e Malavé (2001), relatavam que, os estudantes devem manipular as variáveis dos problemas reais, dentro de condições de aprendizagem controlada, referindo-se a simulação e modelagem. Uma vez que não é possível fazer tais manipulações no sistema elétrico.

Milano, Vanfretti e Morataya (2008, p. 17) diz que, “Os laboratórios de sistemas de energia elétrica sempre foram *virtuais* porque experiências práticas não podem ser realizadas em um sistema de transmissão de alta tensão”. Já De Souza e Dandolini (2009, p. 3) traz que, “As atividades de modelagem e simulação estão entre as formas mais criativas, benéficas e que geram interação de aplicações na Educação”.

Segundo Ausubel (2003), a aprendizagem é dita significativa quando envolve novos significados adquiridos aos temas estudados, sendo este a garantia de que houve de fato aprendizagem significativa. Para Cardoso e Dickman (2012), o uso de simulação computacional faz com que o aluno se torne parte ativa no processo de ensino e aprendizagem, e que, aliada às ideias de Ausubel, permite que o aluno realize atividades conceituais que levam à aprendizagem significativa. O professor é o agente responsável por fazer a ligação entre a aprendizagem e o

aluno, “o docente deve: mediar a aprendizagem; deslocar o foco do ensinar para o aprender; desenvolver situações de aprendizagem desafiadoras; fomentar a autonomia, iniciativa, proatividade e capacidade de solucionar problemas. (BLANCO, et al, 2019, p. 121).

[...] o maior desafio do professor é fazer com que o aluno tenha autonomia na busca do autoaprendizado, ou aprenda a aprender, pois isso, segundo a literatura, é o que proporciona o verdadeiro conhecimento, o qual é originado a partir da autoconstrução cognitiva que faz o indivíduo de acordo com as ações que ele pratica e as abstrações que faz a partir dessas ações [...] Logo, cabe ao educador proporcionar condições para que o aprendiz possa desenvolver estruturas mentais que levem à construção do conhecimento a partir de seu próprio esforço em compreender o conceito por trás do tema de estudo. (TELLES, 2019, p. 14-15).

Segundo os autores mencionados, a simulação e modelagem computacional no ensino, como metodologia, pode proporcionar a aquisição de novos significados aos fenômenos estudados em engenharia elétrica. Cardoso e Dickman (2012, p. 896) alerta que “a simulação computacional deve ser usada como ferramenta de ensino de maneira consciente e estruturada, fazendo parte das atividades dos alunos de forma constante, mas não exclusiva”, pois existem muitos softwares disponíveis, assim deve haver uma estratégia pedagógica quanto ao uso como metodologia de ensino. Silva e Oliveira (2019) diz que é inquestionável a importância do ensino clássico, mas que em disciplinas específicas de engenharia, é necessário o uso de ferramentas computacionais.

Bica, Moldovan e Muji (2008) falam da variedade de ferramentas de simulações de sistemas de potência, distribuídos nas formas comerciais e gratuitas. Milano e Vanfretti (2009) traz que a maioria dos softwares para estudo do sistema elétrico são de uso comercial e caro, e que uma alternativa são os softwares livre de código aberto, como detalha no trabalho “State of the Art and Future of OSS for Power Systems”. Milano e Vanfretti (2009) trazem alguns softwares que podem ser usados de forma gratuita, são eles:

UWPFLOU – Fluxo de potência contínuo;

TEFTS – Estabilidade transitória;

MatPower – Fluxo de potência ótimo;

PSAT – Análise de estabilidade estática e dinâmica;

VST – Estabilidade de tensão;

InterPSS – Análise do sistema de energia para aplicações industriais;

AMES – Mercados de energia de venda integral;

DCOPFJ – Dc fluxo de potência ideal;

Pylon – Fluxo de energia cc e ca e fluxo de energia ótimo cc;

OpenDSS – Planejamento do sistema de distribuição.

A essa lista de ferramentas computacionais podemos citar o ATP, que é um software gratuito, porém com sua licença controlada, usado para a simulação digital de fenômenos transientes eletromagnéticos e eletromecânicos.

Diante destas análises, surge a oportunidade de inserir o uso do software ATP no curso de engenharia elétrica, de modo que no futuro possa ser verificado o quanto eficaz essa ferramenta de ensino pode ser. Em Reis, et al. (2012, p.70) diz que “a modelagem de transformador apresenta grande importância devido ao seu alto uso tanto em sistemas de transmissão de energia, quanto em sistemas de distribuição, por isso a necessidade da utilização da simulação computacional”. Esse contato com os sistemas reais, através das simulações pode proporcionar ao aluno um senso crítico e criativo, uma vez que, eles vão manipular o software para analisar os fenômenos estudados, dando-lhes consciência do conhecimento adquirido. Como afirma De Souza e Dandolini (2009) é esse o perfil do profissional que o mercado de trabalho tem buscado.

2.2 ATP/ATPDraw

Tavares, Campos e Prado (2003, p. 6) relatam que “a partir da década de 60 iniciou-se o desenvolvimento do programa EMTP (Eletromagnetic Transient Program) por Herman W. Dommel, para a Bonneville Power Administration (BPA)”. O EMTP era um software de domínio público, e em 1984, houve uma iniciativa comercial, a partir deste ano surgiu o ATP, devido a não aprovação da proposta de comercialização do EMTP. (PRIKLER; HOIDALEN, 2009). “ATP [...] foi concebido em 1984 por iniciativa dos Doutores W. Scott Meyer e Tsu-Huei Liu, e desde então tem sido aprimorado por meio das contribuições dos seus grupos de usuários oficiais localizados em diversas partes do mundo” (ATP, 2015 apud Tamashiro 2016, p. 1). O ATP é um software capaz de modelar e simular uma gama de fenômenos que envolve transitórios eletromagnéticos.

O Programa de Transientes Alternativos (ATP) é considerado um dos sistemas de programas universais mais utilizados para simulação digital de fenômenos transientes de natureza eletromagnética e eletromecânica em sistemas de energia elétrica. Com este programa digital, redes complexas e sistemas de controle de estrutura arbitrária podem ser simulados. O ATP possui extensos recursos de modelagem e recursos adicionais importantes além do cálculo de transientes. (PRIKLER; HOIDALEN, 2009, p.10, tradução nossa).

Ao longo dos anos o ATP evoluiu, e a codificação de dados que antes era feita por linhas de comando, Figura 1, agora se dá através de uma interface gráfica, o ATPDraw.

Figura 1 – Linhas de comandos do circuito RLC série, arquivo txt

```

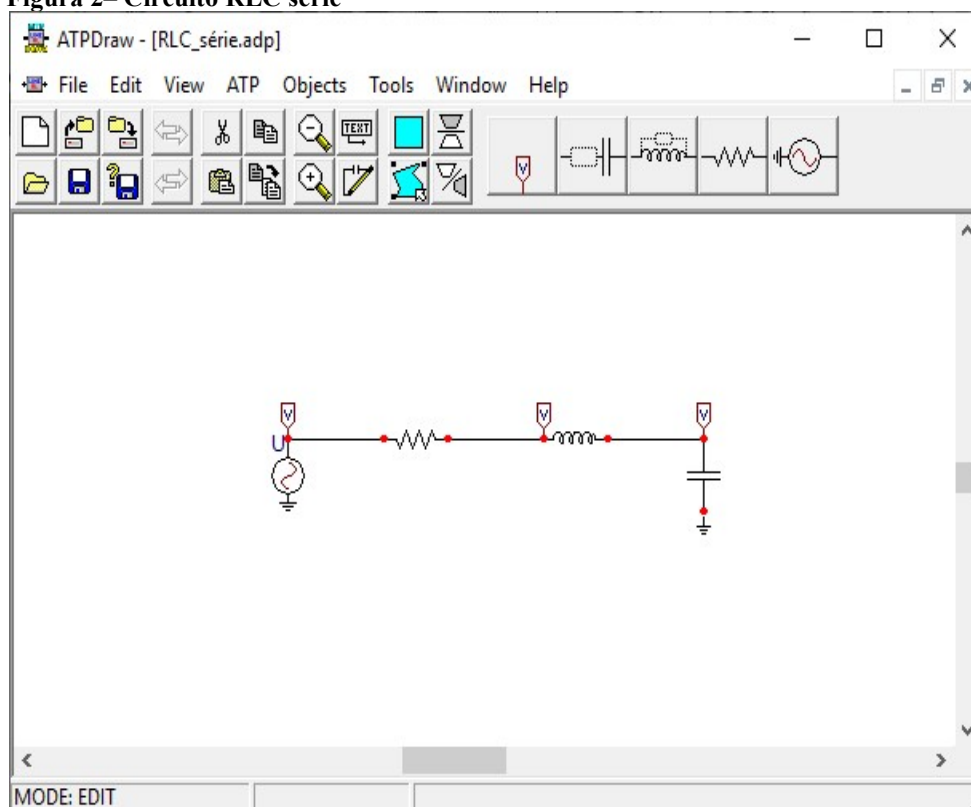
RLC_série - Bloco de notas
Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C dT >> Tmax >> Xopt >> Copt >
  1.E-6 .02
  500   1   1   1   1   0   0   1   0
C   1   2   3   4   5   6   7   8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
  R1   L1               1.E3               0
  L1   C1               100.              0
  C1                   100.              0
/SOURCE
C < n 1><>< Amp1. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
14R1   0   311.13   60.   -90.   -1.   1.
/OUTPUT
  R1   L1   C1
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
|
Windows (CRLF)  Ln 26, Col 1  100%

```

Fonte: Do autor

Cada informação apresentada na Figura 1 tem um formato rigidamente preestabelecido, o endereçamento se dar através de linhas e colunas, o ATP trabalha com 80 colunas, onde as informações são colocadas em intervalos de colunas, a depender do tipo. No exemplo da Figura 1, a amplitude da fonte está no intervalo de coluna de 11 a 20, a frequência, da 21 a 30, e a fase da 31 a 40. As informações à frente da letra “C” são comentários, não fazem parte da compilação do programa.

Com o ATPDraw, o usuário pode construir e simular circuitos elétricos através de modelos existentes de componentes do sistema elétrico, bastando apenas montar o circuito com os blocos disponíveis, como na Figura 2, o próprio software gera as linhas de código, Figura 1, sem que o usuário tenha o trabalho de fazê-lo.

Figura 2– Circuito RLC série

Fonte: Do autor

Tamashiro et al. (2016, p. 3), referindo-se ao ATPDraw, diz o seguinte, “Essa ferramenta possui um ambiente gráfico para a edição de praticamente qualquer sistema elétrico e/ou de controle, sem a exigência de que o usuário seja um profundo conhecedor da sintaxe e da semântica originalmente utilizadas no ATP”.

Segundo Mendonça et al (2007) o ATP é uma ferramenta com boa aceitação no setor elétrico para análises do sistema de potência. A interface gráfica, ATPDraw, permite circuitos monofásicos e trifásicos, sendo que, para circuitos trifásicos não há a necessidade de montar todas as fases, bastando apenas um diagrama unifilar.

O ATPDraw pode ser baixado livremente no site, “<http://www.atpdraw.net/index.php>”, porém como ele é a interface gráfica do software ATP, segue algumas regras de segurança, para evitar a tentativa de comercialização do programa.

O ATPDraw e a presente documentação incluem informações de propriedade do ATP, portanto, o licenciamento do ATP é obrigatório antes de obter permissão para baixar o programa da Internet. A licença ATP é gratuita para todos os que não se envolveram no comércio EMTP e pode ser obtida no Grupo de usuários EMTP canadense/americano ou em um grupo regional autorizado de usuários. (PRIKLER; HOIDALEN, 2009, p.19, tradução nossa).

2.2.1 Simulação

A simulação de circuitos elétricos no ATP se dá de forma intuitiva, através da interface gráfica ATPDraw. No apêndice A é apresentado um tutorial de uso do ATPDraw para simulações, e nele está contido alguns exemplos práticos. Esse tutorial faz parte do material elaborado para um minicurso, realizado em 21 de setembro de 2019, que teve o intuito de apresentar a ferramenta aos alunos da disciplina de Conversão de Energia e Máquinas Elétricas I, do curso de engenharia elétrica do IFTO – Campus Palmas.

2.2.2 Modelagem

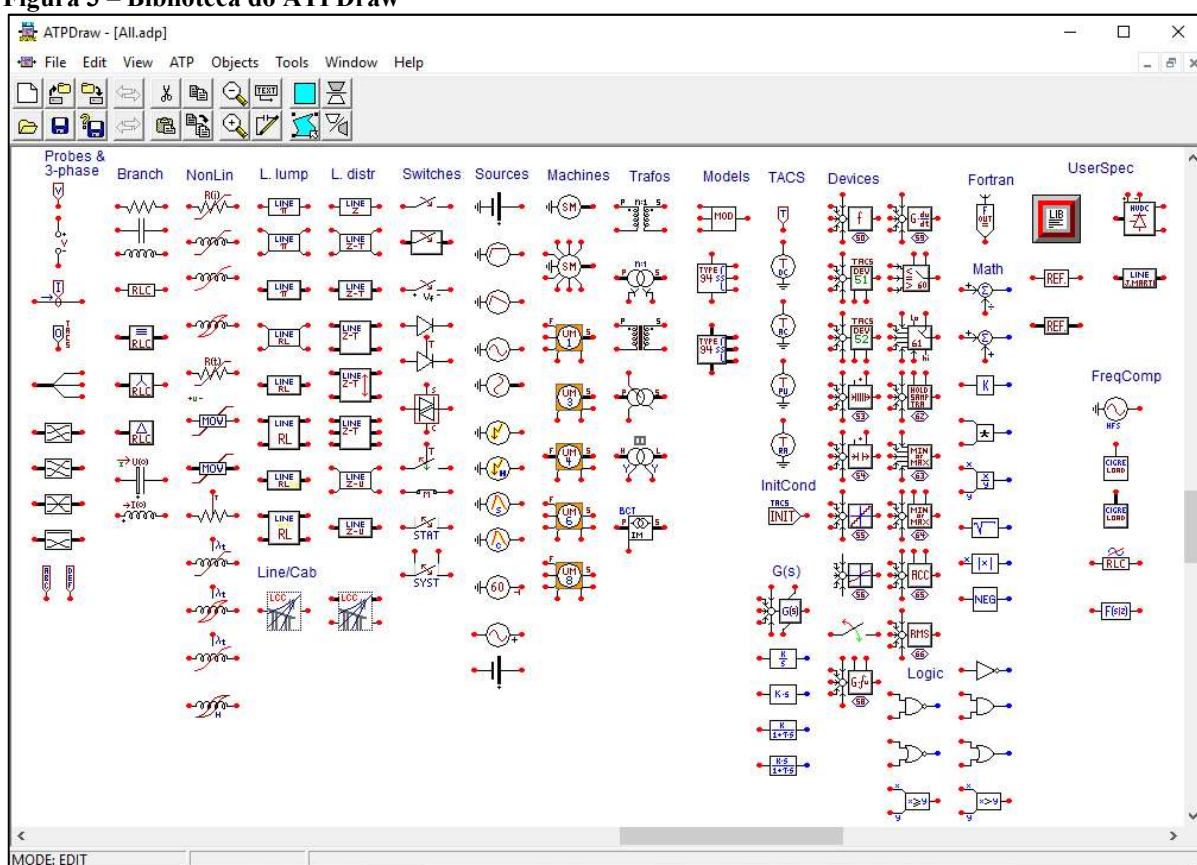
O ATP, como já mencionado, tem a capacidade de modelagem de uma gama variada de fenômenos, circuitos e equipamentos elétricos, e de controle. A modelagem pode ocorrer de algumas formas, a depender do objetivo que o usuário pretende alcançar.

Para modelar um sistema, o usuário pode fazer uso dos componentes existentes no software, que são modelos dos principais componentes de um sistema elétrico; pode usar componentes existentes juntamente com novos componentes (criando novos modelos); ou criar o próprio modelo, do início ao fim. O software permite essa compatibilidade, entre os modelos existentes e os modelados pelo usuário.

O software é bastante flexível, o que o usuário fizer, dentro das regras de sintaxe do ATP, ele estará apresentando um resultado. Diante desta flexibilidade, cabe ao usuário um conhecimento prévio do que está sendo analisando, ou a orientação de um professor responsável, no caso do uso como ferramenta pedagógica.

A Figura 3 apresenta a biblioteca de modelos do ATPDraw, são estes os componentes já disponíveis para o usuário utilizar na simulação de um circuito simples ou um complexo sistema.

Figura 3 – Biblioteca do ATPDraw



Fonte: Biblioteca do Software ATPDraw

Para criar um modelo, o usuário dispõe da biblioteca apresentada na Figura 3, da linguagem MODELS, do recurso DATA MODULARIZATION, e dos blocos de Análise Transitória de Sistemas de Controle (TACS), este último já faz parte da biblioteca do ATPDraw.

2.2.2.1 MODELS

Ao contrário da modelagem a partir dos componentes disponíveis no ATPDraw, onde não requer um conhecimento prévio em uma linguagem específica, bastando apenas criar os circuitos, porém limitada aos componentes existentes, a linguagem de simulação MODELS, requer conhecimento sobre a sintaxe e a estrutura geral da MODELS, e permite a modelagem de qualquer parte do sistema elétrico.

MODELS é uma linguagem de descrição técnica geral, suportada por um solucionador de simulação. É uma linguagem de programação direcionada à simulação no domínio do tempo e é usada como uma ferramenta para descrever o comportamento dinâmico de sistemas físicos complexos. No ATP, pode ser usado para descrever a operação de componentes de circuito e de controle. Também pode ser usado para gerar sinais ou para analisar medições do circuito. Finalmente, pode ser usado como interface entre o ATP e programas externos. (DUBÉ, 1996, p. 2, tradução nossa).

O autor da linguagem MODELS, Laurent Dubé, em Dubé (1996), traz quatro vantagens em se trabalhar com a MODELS, sendo elas: desenvolver modelos de componentes de circuito e controle; ter a flexibilidade de uma linguagem de programação completa, sem precisar interagir com o ATP, no nível de programação; ser capaz de descrever, não apenas como um componente opera, mas também como o estado inicial do componente é estabelecido; interface de programa padrão para ATP definida no nível de modelagem, em termos de tensões, correntes e sinais de controle.

A estrutura da linguagem é simples e é semelhante à estrutura de outras linguagens de programação, por exemplo, Pascal ou Modula-2. Possui um pequeno número de palavras-chave que podem ser lembradas facilmente. Não há regras de formatação para complicar seu uso, e cada construção é introduzida por uma palavra-chave descritiva. (DUBÉ, 1996, p. 3, tradução nossa).

“Um componente criado na MODELS recebe sinais de corrente e tensão do ATP/ATPDraw, que podem ser manipulados de tal forma a gerar uma resposta a ser novamente enviada ao sistema”. (TAVARES, 2013, p. 29).

Para criar um modelo utilizando MODELS é necessário escrever um arquivo no formato texto a partir de um editor comum, com a sintaxe da linguagem e salvar com extensão .MOD, informa Tamashiro (2016). Na Figura 4 está a estrutura básica da linguagem MODELS.

Figura 4 – Estrutura da linguagem MODELS

```

MODEL nome_do_arquivo
COMMENT      -- início do documentário
              O que estiver entre estas COMMENT e ENDCOMMENT
              sao comentários, não faz parte da compilação do programa
ENDCOMMENT   -- fim do contário
DATA         -- dados de entrada, podendo ser alterada na simulação
INPUT        -- grandezas de entrada de um modelo externo
OUTPUT       -- grandezas de saída para serem utilizadas na rede do ATP, modelo externo
CONST        -- constantes utilizadas no modelo
VAR          -- variáveis usadas no grupo MODEL a serem manipulados em EXEC
DELAY        -- instrui a MODELS a reservar um espaço na memória para a HISTORY
FUNCTION      -- funções utilizadas no modelo
HISTORY       -- histórico passado das varáveis, alocados em DELAY
INIT          -- condições iniciais das variáveis usadas em EXEC, exceto as declaradas
              em DATA, HISTORY,CONST e INPUT, ENDINIT
ENDINIT       -- finaliza a inicialização
EXEC          -- início da excução do algoritmo
ENDEXEC       -- fim da execução do algoritmo
ENDMODEL      -- fim da instrução MODEL
RECORD        -- plotagem das variáveis
|
  
```

Fonte: Do autor

Com o modelo escrito, dentro da estrutura apresentada na Figura 4, é possível criar um bloco gráfico no ATPDraw. Existem duas opções para a criação de um objeto de modelo no ATPDraw: criando um arquivo de suporte manualmente em objects/Model/New sup-file e um arquivo .MOD correspondente, ou, criando um arquivo .MOD separado, Figura 4, ou um texto de modelo internamente e retransmitir no ATPDraw, através de MODELS/files(sup/mod), para identificação e layout (bloco), automáticos.

Na Figura 5 é apresentada a janela de criação do arquivo de suporte, de forma manual, é aqui que o usuário vai dar forma gráfica ao modelo.

Figura 5 – Janela de criação manual de arquivo de suporte em objects/Model/New sup-file

Name	Default	Min	Max	Param	Digits
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0

Standard data

☐ High precision

☐ Output enable

☐ Nonlinear

Type: Model

Num. data: 2

Num. nodes: 2

Save Save As

Exit Help

Fonte: Software ATPDraw

Um arquivo .MOD é o arquivo de texto escrito pelo usuário, na linguagem MODELS e salvo com a extensão .MOD, na pasta mod, no diretório raiz do ATP, a partir deste arquivo, cria-se o arquivo de suporte .SUP, no ATPDraw, de forma manual ou automática, como descrito acima. Um objeto ATPDraw consiste em um arquivo no disco chamado arquivo de suporte, com extensão .SUP. Um arquivo de suporte é padrão para todos os componentes do ATPDraw e contém o ícone, informações sobre tipos e posições de nós e parâmetros de dados. (ATPDRAW, 2019). Resumindo o parágrafo anterior, o arquivo de suporte, para o usuário, é o bloco gráfico, propriamente dito.

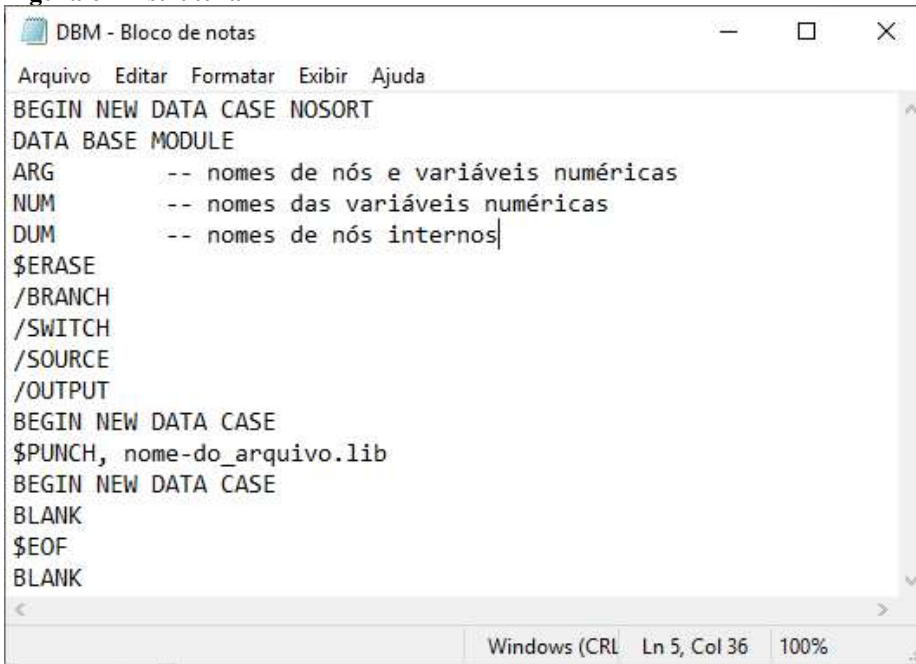
2.2.2.2 Data modularization

A modularização de dados consiste em utilizar um modelo de sistema ou circuito como referência, e a partir deste, criar um modelo compacto, melhorando seu uso e distribuição para outros usuários, além da vantagem visual, pois um emaranhado de componentes passam a ser representados por um único bloco.

O ATP apresenta uma facilidade, denominada “DATA MODULARIZATION”, que permite a criação de bibliotecas de modelos, expandindo e melhorando o uso do programa em várias aplicações. Um ou mais componentes do programa podem ser agrupados num único módulo, o qual passaria a ser visto pelo ATP como se fosse um modelo. [...]. Somente alguns parâmetros são explicitados na criação dos módulos, tais como os nomes das barras de conexão e valores numéricos dos componentes, os quais são especificados pelo usuário como se fossem os argumentos de uma sub-rotina. O programa de suporte que executa esta função é o “DATA BASE MODULE”. (BACCA, 2007, p. 78).

A Figura 6 apresenta a estrutura da DATA BASE MODULE (DBM).

Figura 6 – Estrutura DBM



```

Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
BEGIN NEW DATA CASE NOSORT
DATA BASE MODULE
ARG      -- nomes de nós e variáveis numéricas
NUM      -- nomes das variáveis numéricas
DUM      -- nomes de nós internos|
$ERASE
/BRANCH
/SWITCH
/SOURCE
/OUTPUT
BEGIN NEW DATA CASE
$PUNCH, nome-do_arquivo.lib
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
$EOF
BLANK
Windows (CRL  Ln 5, Col 36  100%

```

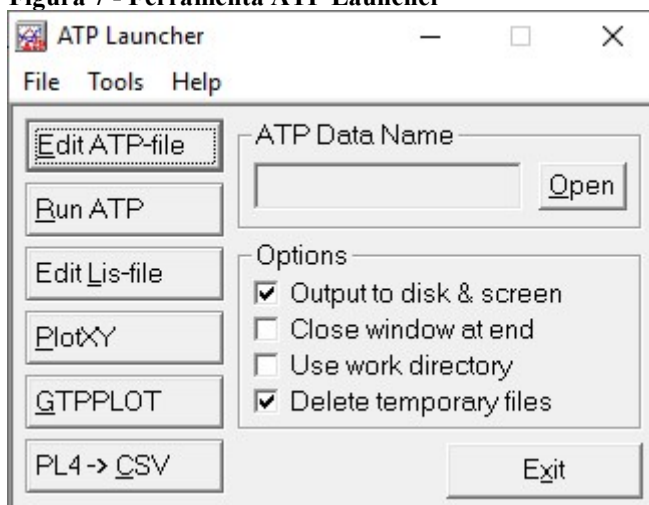
Fonte: Do autor

O arquivo representado pela Figura 6 deve ser salvo com a extensão .ATP, através deste arquivo e da ferramenta ATP Launcher, cria-se o arquivo de biblioteca .LIB. O arquivo .LIB deve ser carregado dentro do arquivo de suporte .SUP, representado na Figura 5 do caso anterior, criado através do ATPDraw.

O programa ATP Launcher é usado para controlar a execução do ATP em ambientes MS-windows, sem que o usuário tenha que se preocupar com o controle das opções do ATP a cada execução. Escreve-se um arquivo contendo os dados e parâmetros representativos dos circuitos em um arquivo de texto comum, que deverá ter a terminação “atp” e uma estrutura de formatação de dados. (MIGUEL, 2011, p. 36-37).

A Figura 7 mostra a janela da ferramenta ATP Launcher, onde, no campo “Open” é carregado o arquivo representado na Figura 6, salvo com extensão .ATP. Em “Run ATP” é gerado o arquivo .LIB.

Figura 7 - Ferramenta ATP Launcher



Fonte: Software ATP

2.2.2.3 TACS

O TACS são blocos de Análise Transitória de Sistemas de Controle.

O TACS é um módulo de simulação para análise no domínio do tempo de sistemas de controle. [...]. Para o TACS, é usada uma representação em diagrama de blocos dos sistemas de controle. O TACS pode ser usado para a simulação dos controles do conversor HVDC. Sistemas de excitação de máquinas síncronas. Eletrônicos de potência e acionamentos, arcos elétricos (arcos de disjuntor e falha). A interface entre a rede elétrica e o TACS é estabelecida pela troca de sinais como tensão do nó, corrente do comutador, status do comutador, resistência variável no tempo, fontes de tensão e corrente. (PRIKLER; HOIDALEN, 2009, p.11, tradução nossa).

BACCA (2007, p. 78), explica que, com os blocos TACS “é permitido representação de funções de transferência, somadores, multiplicadores, limitadores estáticos e dinâmicos, funções algébricas e lógicas, fonte de sinal, chaves controladas, funções definidas pelo usuário, etc”. O TACS é um conjunto de rotinas que faz parte da biblioteca do ATPDraw,

é um recurso bastante útil na modelagem, uma vez que, sendo blocos prontos, basta montá-los de acordo com o circuito modelado.

2.3 Transformador

2.3.1 Transformadores de potência

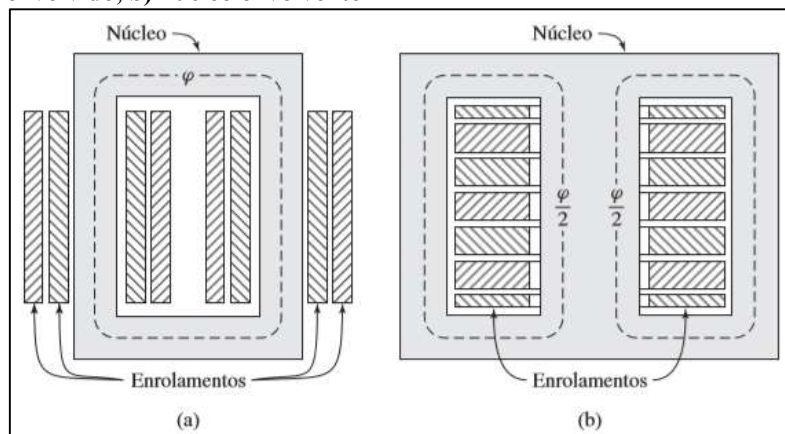
Chapman (2013) traz que, a finalidade principal de um transformador é a conversão de potência elétrica CA de um nível de tensão para outro, mantendo a mesma frequência, estes são os denominados transformadores de potência. As outras finalidades de transformadores são: amostragem de tensão e de corrente, TPs e TCs; transformador de potencial e transformador de corrente, respectivamente.

Segundo Umans (2014), para funcionamento, um transformador precisa apenas de um fluxo magnético mútuo variável no tempo, enlaçando seus enrolamentos, podendo estes estar acoplados pelo ar, ou núcleo de algum material ferromagnético, o que proporciona um caminho de alta permeabilidade para o fluxo percorrer. Este último é normalmente denominado transformador de núcleo de ferro. Kosow (1982) informa que, se o acoplamento magnético for ruim, como no caso do ar, frouxamente acoplados, apenas uma pequena quantidade de energia é transferida do primário ao secundário, porém, se as bobinas são solidárias a um mesmo núcleo de ferro, dito fortemente acoplados, quase toda energia da fonte é transferida ao secundário.

2.3.2 Características construtivas

Os transformadores de potência são construídos de dois tipos, núcleo envolvente e núcleo envolvido, como afirmam Del Toro (1999), Chapman (2013) e Umans (2014). Transformadores de núcleo envolvente é construído com chapas delgadas, possuindo três pernas, os enrolamentos estão acoplados sobre a perna central, como mostra a Figura 8-b, o de núcleo envolvido, assim como o citado anteriormente, constituem de chapas delgadas na forma retangular, com os enrolamentos envolvendo as duas extremidades do núcleo, Figura 8-a, em ambos os casos, as chapas são eletricamente isoladas entre si.

Figura 8 – Esquema construtivo de transformadores, a) núcleo envolvido, b) núcleo envolvente



Fonte: Chapman (2013)

Os autores Del Toro (1999), Chapman (2013) e Umans (2014), afirmam que, a construção com núcleo de ferro é para minimizar o fluxo magnético disperso, devido à baixa permeabilidade magnética do material, e as chapas delgadas são para minimizar as correntes parasitas.

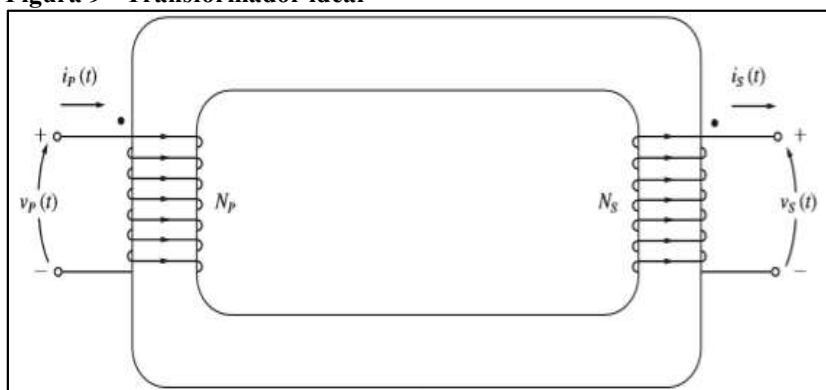
Segundo Del Toro (1999), o transformador com núcleo envolvido é preferido para altas tensões, por facilitar a isolação entre as bobinas, já os de núcleo envolvente, é preferido em transformador de potência, onde circulam elevadas correntes.

2.3.3 Transformador ideal

“Um transformador ideal é um dispositivo sem perdas, com um enrolamento de entrada e um enrolamento de saída. As relações entre a tensão de entrada e a tensão de saída e entre a corrente de entrada e a corrente de saída são dadas por duas equações simples”. (CHAPMAN, 2013, p. 69), ou seja, não são consideradas as perdas no cobre das bobinas e nem do núcleo ferromagnético.

O enrolamento que recebe a energia da fonte de potência CA é chamado de primário, já o que está conectado a carga, é o secundário, veja Figura 9.

Figura 9 - Transformador ideal



Fonte: Chapman

Em um transformador ideal, a potência é mantida constante:

$$S_p = S_s \quad (1)$$

S_p : potência de entrada;

S_s : potência de saída.

A relação entre o número de espiras do enrolamento primário e secundário é denominado de relação de transformação, e a relação entre a tensão do lado primário e secundário é determinada pela equação (2),

$$\frac{v_p(t)}{v_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = a \quad (2)$$

N_p : número de espiras no enrolamento primário;

N_s : número de espiras no enrolamento secundário;

a : relação de transformação.

Da potência tem-se a seguinte igualdade:

$$v_p i_p = v_s i_s,$$

que resulta na relação entre as correntes nos lados primário e secundário, como mostra equação (3),

$$\frac{i_p}{i_s} = \frac{1}{a} \quad (3)$$

Onde;

v_p : tensão no enrolamento primário do transformador;

v_s : tensão no enrolamento secundário do transformador;

i_p : corrente no lado primário;

i_s : corrente no lado secundário.

Estando o secundário do transformador conectado a uma carga de impedância Z_L , com o conhecimento das equações acima e operando com a lei de ohm, podemos encontrar a

impedância da carga referida ao lado primário do transformador. “O processo de substituir um lado de um transformador pelo seu equivalente de nível de tensão no outro lado é conhecido como referir ou refletir o primeiro lado do transformador ao segundo lado”. (CHAPMAN, 2003, p. 73).

A impedância de uma carga é igual a relação tensão e corrente;

$$Z_L = \frac{V_s}{I_s} \quad (4)$$

no primário do transformador a impedância é;

$$Z'_L = \frac{V_p}{I_p}$$

$$Z'_L = \frac{V_s a}{\frac{I_s}{a}}$$

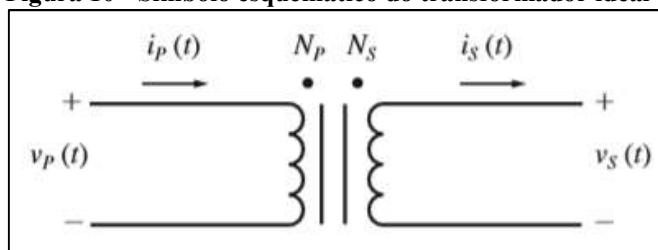
$$Z'_L = \frac{V_s}{I_s} a^2$$

desta equação sai a relação entre as impedâncias;

$$Z'_L = Z_L a^2 \quad (5)$$

“Em um transformador ideal, as tensões são transformadas na razão direta da relação de espiras; as correntes, na razão inversa, e as impedâncias, na razão direta da relação de espiras ao quadrado. A potência e os volts-ampères não alteram”. (UMANS, 2014, p.72-73). Para o estudo de um transformador ideal, bastam apenas as equações e 1, 2 e 3. A Figura 10 mostra o símbolo esquemático do transformador ideal.

Figura 10 - Símbolo esquemático do transformador ideal



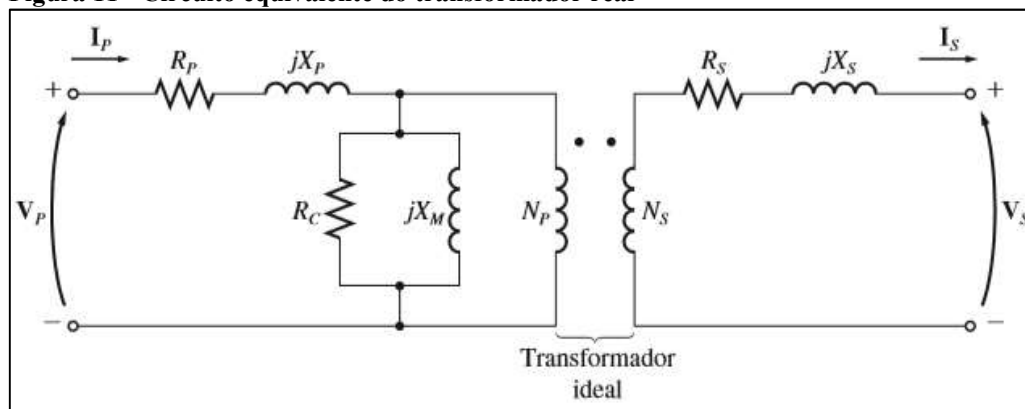
Fonte: Chapman (2013)

2.3.4 Transformador real

Diferentemente do transformador representado na forma ideal, o modelo real é mais complexo, seu funcionamento leva em consideração outros parâmetros, além da relação de espiras. “Um modelo mais completo deve levar em consideração os efeitos das resistências dos

enrolamentos, os fluxos dispersos e as correntes finitas de excitação relativas à permeabilidade finita (não linear, na realidade) do núcleo” (UMANS, 2014, p.74). O fluxo disperso no primário e secundário produz uma reatância indutiva X_p e X_s , e os condutores dos enrolamentos primário e secundário oferecem uma resistência interna R_p e R_s , (KOSOW, 1982). Na Figura 11 está representado o circuito equivalente do transformador real. Del Toro (1999) diz que, um circuito equivalente é apenas a interpretação de equações que descrevem o comportamento do dispositivo.

Figura 11 - Circuito equivalente do transformador real



Fonte: Chapman (2013)

Onde:

I_p : corrente no enrolamento primário;

V_p : tensão no enrolamento primário;

R_p : resistência do enrolamento primário;

X_p : reatância devida a indutância de dispersão no enrolamento primário;

R_s : resistência do enrolamento secundário;

X_s : reatância devida a indutância de dispersão no enrolamento secundário;

I_s : corrente no enrolamento secundário;

V_s : tensão no enrolamento secundário;

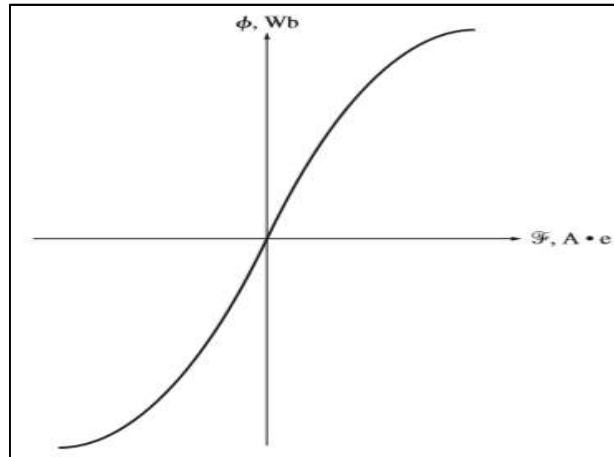
R_c : resistência de perda no núcleo;

X_m : reatância de magnetização.

As resistências e reatâncias dos enrolamentos primário e secundário, respectivamente, produzem quedas de tensão no interior do transformador, como resultado das correntes primária e secundária. Embora estas quedas de tensão sejam internas, é conveniente representá-las externamente como parâmetros puros em série com um transformador ideal. (KOSOW, 1982, p. 524).

Quando o transformador é alimentado, flui no enrolamento primário uma corrente necessária para produzir o fluxo magnético no núcleo do transformador, essa corrente é composta por duas componentes, a corrente de magnetização i_m e a corrente de perdas no núcleo i_{h+p} , esta segunda é responsável pelas perdas por histerese e correntes parasitas. A Figura 12 traz a curva de magnetização do transformador.

Figura 12 – Curva de magnetização do núcleo do transformador



Fonte: Chapman (2013)

A partir da lei de Faraday é possível obter a explicação do funcionamento do transformador, em que:

$$e_{in} = \frac{d\lambda}{dt}$$

onde, “ λ é o fluxo concatenado na bobina na qual a tensão está sendo induzida e e_{in} é a tensão na bobina. O fluxo concatenando λ é a soma do fluxo que passa através de cada espira da bobina adicionada aos de todas as demais espiras da bobina” (CHAPMAN, 2013, p. 77). O fluxo médio por espira pode ser representado por;

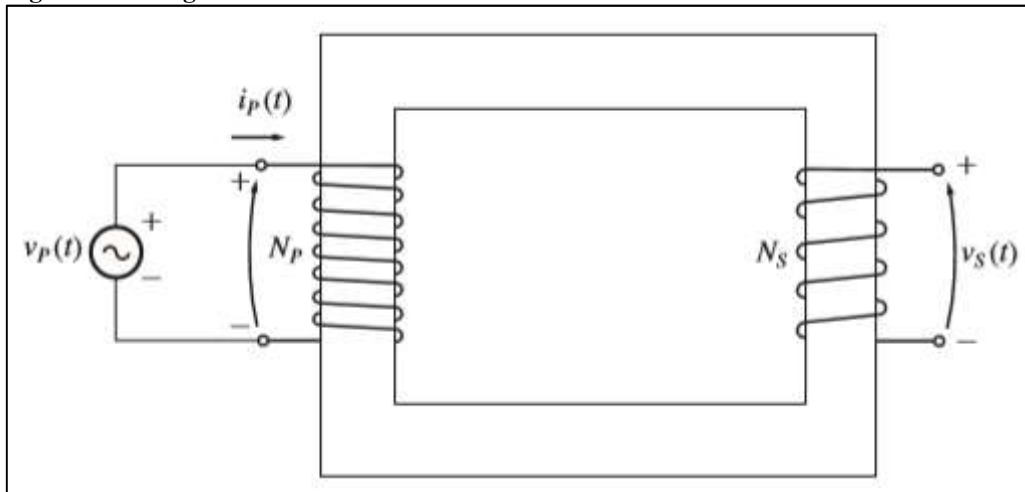
$$\bar{\Phi} = \frac{\lambda}{N}$$

e a tensão induzida, pela lei de Faraday fica assim;

$$e_{in} = N \frac{d\bar{\Phi}}{dt} \quad (6)$$

A partir da equação (7), com a tensão da fonte v_p igual a e_{in} , Figura 13, é possível encontrar a expressão para o fluxo médio $\bar{\Phi}$ no enrolamento primário.

Figura 13 – Diagrama de um transformador real



Fonte: Chapman (2013)

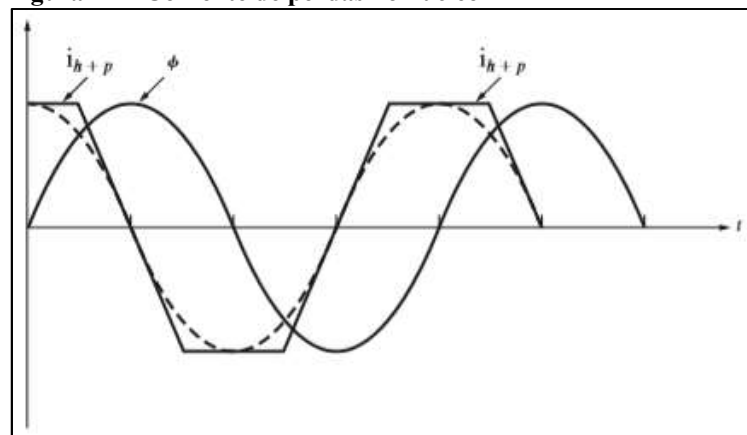
$$\bar{\Phi} = \frac{1}{N} \int v_p(t) dt \quad (7)$$

Levando em consideração apenas o fluxo mútuo, o fluxo resultante no primário será

$$\bar{\Phi} = \frac{V_{\max}}{\omega N} \sin \omega t \quad (8)$$

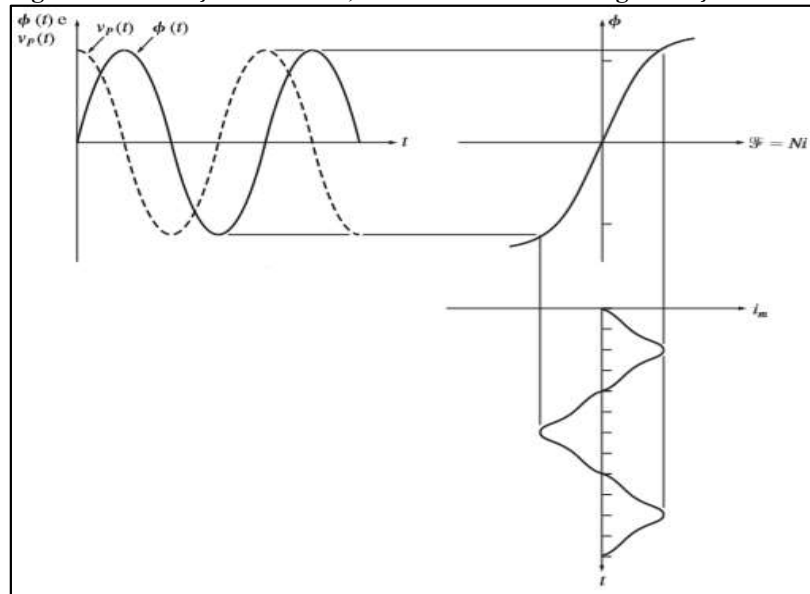
Em Chapman (2013), consta que, o fluxo no núcleo é senoidal, conforme a Figura 14, e a corrente de perda no núcleo é proporcional a variação temporal do fluxo, assim a corrente é máxima quando o fluxo é zero, o que resulta nas perdas máximas no núcleo quando o fluxo passa por zero. A corrente de perdas não é linear devido aos efeitos não lineares da histerese, e a componente fundamental da corrente está em fase com a tensão aplicada no núcleo, como mostra as Figuras 14 e 15.

Figura 14 – Corrente de perdas no núcleo



Fonte: Chapman (2013)

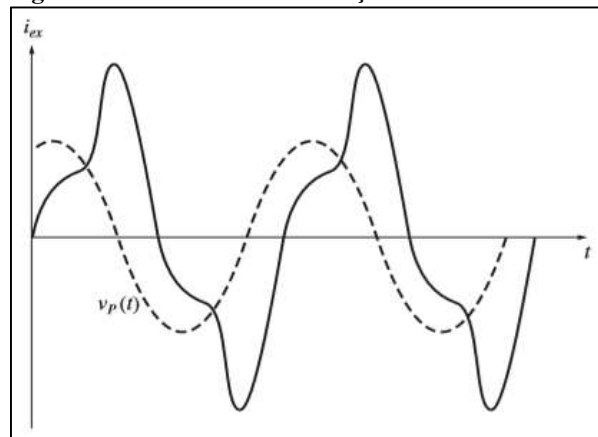
A Figura 15 mostra a tensão e fluxo no enrolamento primário, além da corrente de magnetização.

Figura 15 – Relação de tensão, fluxo e corrente de magnetização

Fonte: Chapman (2013)

A soma da corrente de magnetização, componente reativa, e de perdas no núcleo, componente ativa, resulta na corrente total de excitação (OLIVEIRA, COGO e ABREU, 2018), como na Figura 16.

$$i_{ex} = i_m + i_{h+p} \quad (9)$$

Figura 16 – Corrente de excitação do transformador

Fonte: Chapman (2013)

2.3.5 Parâmetros básicos de um transformador

Os parâmetros básicos de um transformador real foram mostrados no circuito equivalente, Figura 11. Conhecendo estes parâmetros é possível calcular o desempenho do transformador em todas as condições de operação, quando conhecido o projeto do transformador, os parâmetros podem ser calculados a partir das propriedades construtivas dos

materiais. (DEL TORO,1999). Outro meio de determinar os parâmetros do transformador é através de ensaios. Dois ensaios específicos podem determinar de forma simples tais parâmetros, ensaio a vazio e o de curto-circuito.

Segundo Oliveira, Cogo e Abreu (2018), o ensaio a vazio tem o objetivo de determinar as perdas no núcleo ou perdas por histerese e correntes parasitas, a corrente a vazio, a relação de transformação e os parâmetros do ramo magnetizante, já o ensaio em curto-circuito determina as perdas no cobre, impedância, resistência e reatância percentual.

2.3.6 Ensaio a vazio

No ensaio a vazio, ou seja, sem carga, a tensão nominal é aplicada a um enrolamento, normalmente no lado de baixa tensão, estando o outro em aberto, assim a corrente circula apenas pelo enrolamento onde a tensão é aplicada. Em Oliveira, Cogo e Abreu (2018, p.1) “como os fluxos magnéticos na condição de carga ou a vazio são praticamente iguais, com o ensaio em pauta, podem-se determinar as perdas por histerese e por corrente parasitas”, denominadas perdas no núcleo P_0 .

$$P_0 = V_n I_0 \cos\varphi$$

A corrente circulando no transformador é apenas a corrente do ramo magnetizante, ou seja, apenas uma porcentagem da corrente nominal, $I_n\%$.

$$P_0 = V_n I_n \% \frac{S_{n1\varnothing}}{V_n} \cos\varphi [\omega] \quad (10)$$

Corrente a vazio I_0 – para suprir as perdas e para a produção do fluxo magnético, o primário absorve da rede de alimentação uma corrente denominada corrente a vazio, cuja magnitude pode ser da ordem de até 6% da magnitude da corrente nominal desse enrolamento. (OLIVEIRA; COGO; ABREU, 2018, p.3).

$$I_0 = I_n \% I_n$$

$$I_0 = I_n \% \sqrt{2} \frac{S_{n1\varnothing}}{V_n} [A] \quad (11)$$

A corrente a vazio se divide em duas no ramo magnetizante, uma corrente real I_{rmag} , responsável pelas perdas no núcleo, e uma imaginária I_{imag} , responsável pela magnetização, com defasagens de 90° .

$$I_{rmag} = \frac{P_0}{V_n} \quad (12)$$

$$I_{\text{imag}} = \sqrt{I_0^2 - I_{\text{rmag}}^2} \quad (13)$$

Fator de potência a vazio FP – transformadores a vazio tem um baixo fator de potência, pois a corrente a vazio é em maior parte para a magnetização do núcleo.

$$FP = \cos\varphi = \frac{P_0}{V_n I_0} \quad (14)$$

Impedância do ramo magnetizante Z_m – “o ramo magnetizante pode ser colocado no primário ou no secundário, mas não nos dois enrolamentos simultaneamente.” (OLIVEIRA; COGO; ABREU, 2018, p.13). A impedância pode ser determinada pela equação abaixo.

$$Z_m = \frac{V_n}{I_0} [\Omega] \quad (15)$$

Resistência do ramo magnetizante R_c – representa as perdas no ferro, é obtida aplicando a tensão nominal do lado no qual é realizada a energização do transformador a vazio.

$$R_c = \frac{V_n^2}{P_0} [\Omega] \quad (16)$$

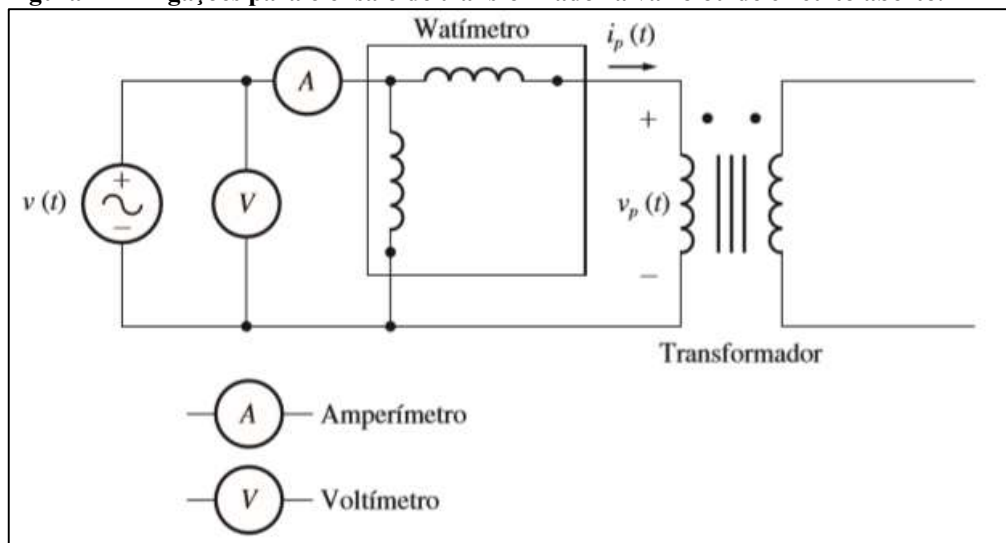
Reatância do ramo magnetizante X_m – reatância responsável pela produção do fluxo principal.

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_c^2} [\Omega], \text{ ramo série} \quad (17)$$

ou

$$X_m = \frac{V_n}{I_{\text{imag}}} [\Omega], \text{ ramo paralelo} \quad (18)$$

Figura 17 – Ligações para o ensaio de transformador a vazio ou de circuito aberto.



Fonte: Chapman (2013)

2.3.7 Ensaio de curto-circuito

A operação em curto-circuito se dar para obter as perdas no cobre, a queda de tensão interna, as impedâncias, resistências e reatância percentual. Neste ensaio, os terminais de baixa tensão do transformador são curto-circuitados, e, no lado de alta, é aplicado uma tensão variável, afim de obter a corrente nominal no lado de baixa tensão. Esse processo é feito desta maneira por questões de segurança de quem está realizando o ensaio, como para manter a integridade construtiva do equipamento ensaiado.

Segundo Chapman (2013), como a tensão de entrada é baixa e a corrente no ramo de excitação sendo desprezível, a queda de tensão no transformador é devido apenas a impedância série do circuito, que pode ser expressa pela equação 19.

$$|Z_{cc}| = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} [\Omega] \quad (19)$$

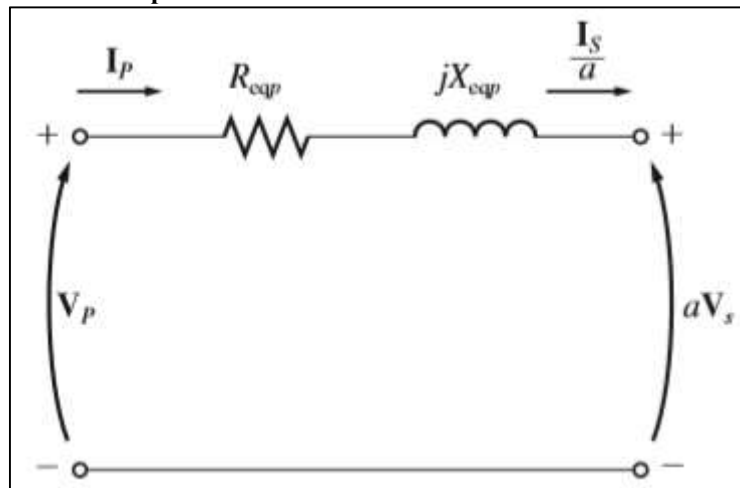
Onde:

Z_{cc} : impedância série do circuito equivalente referido ao primário do transformador;

V_{cc} : tensão de curto-circuito aplicado no primário do transformador;

I_{cc} : corrente de curto-circuito no enrolamento primário.

Figura 18 – Circuito equivalente aproximado referido ao primário, considerado para ensaio de curto-circuito



Fonte: Chapman (2013)

$$R_{eqp} = R_p + R_s a^2 [\Omega] \quad (20)$$

$$X_{eqp} = X_p + X_s a^2 [\Omega] \quad (21)$$

$$Z_{cc} = R_{eqp} + jX_{eqp} [\Omega] \quad (22)$$

Perdas no cobre P_{cu} – perdas por efeito Joule nos enrolamento primário e secundário do transformador.

$$P_{cu} = R_p I_p^2 + R_s I_s^2 \text{ [W]} \quad (23)$$

Impedância $Z_{\%}$ – é expressa em porcentagem, pois no ensaio de curto-circuito é aplicado apenas porcentagem da tensão nominal no lado de alta.

$$Z_{\%} = \frac{V_{cc}}{V_n} 100 \quad (24)$$

Resistências R_p e R_s – com os valores de potência e corrente medidas pelos instrumentos, é possível determinar as resistências do primário e secundário, a partir das equações 26 e 27. Considerado a relação de transformação e a resistência do secundário referida ao primário:

$$R_{eqp} = \frac{P_{cc}}{I_p^2} \text{ [\Omega]} \quad (25)$$

$$R_{eqp} = 2R_p$$

$$R_p = \frac{R_{eqp}}{2} \text{ [\Omega]} \quad (26)$$

$$R_s = \frac{R_p}{a^2} \text{ [\Omega]} \quad (27)$$

Reatâncias X_p e X_s – podem ser determinadas a partir da relação entre Z_{cc} e R_{eqp} .

$$X_{eqp} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{eqp}^2} \text{ [\Omega]} \quad (28)$$

$$X_{eqp} = 2X_p$$

$$X_p = \frac{X_{eqp}}{2} \text{ [\Omega]} \quad (29)$$

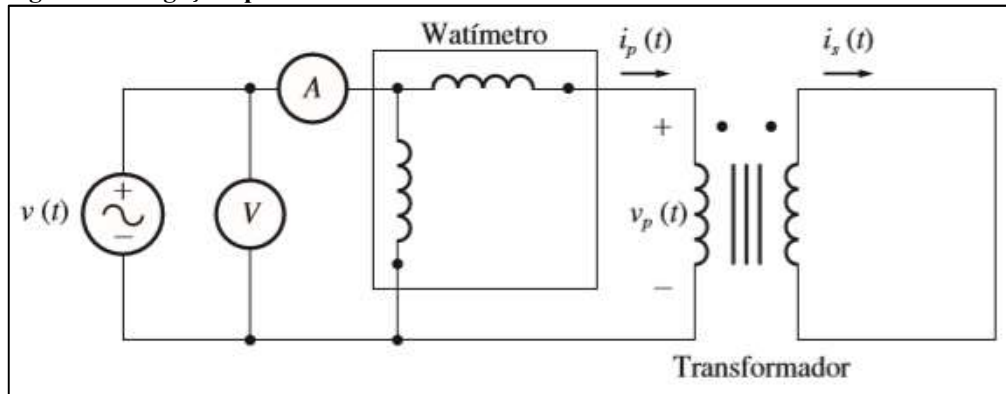
$$X_s = \frac{X_p}{a^2} \text{ [\Omega]} \quad (30)$$

Resistência $R_{\%}$ e $X_{\%}$ - “para evitar a dependência com o lado de referência, procurou-se representar tais resistências por um elemento que independa do lado a que são referidos.” (OLIVEIRA; COGO; ABREU, 2018, p.24).

$$R_{\%} = \frac{P_{cc}}{S_n} 100 \quad (31)$$

$$X_{\%} = \sqrt{Z_{\%}^2 - R_{\%}^2} \quad (32)$$

Figura 19 - Ligações para o ensaio de transformador em curto-circuito.



Fonte: Chapman (2013)

2.3.8 Regulação de tensão e rendimento

“Para a utilização de um transformador em um sistema elétrico, uma série de requisitos é desejada. Entre eles, citam-se o rendimento e a regulação. Para transformadores de potência é sempre exigida uma baixa regulação com um alto rendimento”. (OLIVEIRA; COGO; ABREU, 2018, p.48).

Kosow (1982) informa que, a diferença entre a tensão secundária, refletida ao primário, e a tensão aplicada ao primário é igual a queda de tensão na impedância equivalente interna do transformador, e que, essa relação se mantém entre a tensão a vazio e a tensão nos terminais secundário do transformador submetido a uma carga. A regulação de tensão é porcentagem de tensão que deve ser induzida no enrolamento secundário do transformador para que se tenha, em seus terminais, tensão nominal disponível à carga. A equação 33 mostra a relação entre as grandezas para se obter a regulação de tensão.

$$R_{reg\%} = \frac{E_2 - V_s}{V_s} 100 \quad (33)$$

Onde:

E_2 : tensão a vazio induzida no secundário;

V_s : tensão nos terminais secundário, conectado a carga.

$R_{reg\%}$: porcentagem de tensão a ser acrescida ou diminuída da tensão induzida no enrolamento secundário.

A tensão induzida no secundário pode ser determinada através da equação 34, apresentada em Kosow (1982);

$$E_2 = (V_s \cos \phi + I_s R_{eqs}) + j(V_s \sin \phi \pm I_s X_{eqs}) \quad (34)$$

A regulação de tensão pode ser nula, positiva ou negativa, a depender da carga atendida, resistiva, indutiva ou capacitiva.

Um outro requisito desejado é o rendimento, onde é feita a relação entre a potência fornecida ao transformador e a potência entregue a carga. A transferência de energia de um terminal para outro do transformador, acompanha perdas, perdas no núcleo, nos enrolamentos, e perdas adicionais. (OLIVEIRA; COGO; ABREU, 2018). A equação 35 indica o rendimento em porcentagem.

$$n_{\%} = \frac{P_2}{P_1} 100 \quad (35)$$

Onde:

$n_{\%}$: rendimento do transformador;

P_1 : potência de entrada;

P_2 : potência de saída.

$$P_2 = V_s I_s \cos \phi \quad (36)$$

$$P_1 = P_2 + P_0 + P_{cc} \quad (37)$$

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O trabalho desenvolvido iniciou-se com um levantamento bibliográfico sobre simulações e modelagens computacionais, ensino de engenharia e o software ATP, concomitantemente com as demais etapas; preparação e realização do minicurso, para apresentação e uso do software, aos estudantes da turma de Conversão de Energia e Máquinas Elétricas I, do curso de Engenharia Elétrica do IFTO; após as etapas iniciais foram realizados ensaios em um transformador monofásico no laboratório de máquinas elétricas do IFTO, onde foram feitas as medições dos ensaios a vazio e de curto-circuito. Por fim foram realizadas a modelagem do transformador, a simulação e comparação dos resultados modelados e ensaiados em laboratório, assim como a simulação com valores de transformadores exemplificados em literaturas diversas. A escrita do TCC ocorreu durante todo o período de desenvolvimento das atividades.

3.1 Ensaios em laboratório

Os ensaios foram realizados juntamente com os professores Márcio Augusto Tamashiro e Kaison Teodoro de Souza, no laboratório de máquinas elétricas do IFTO. Para isso foram utilizados um transformador monofásico, variador de tensão (variac), wattímetro digital e multímetro.

Os dados de placa do transformador são:

Fabricante: INDUTEC N° 881610;

Potência: 3 kVA;

Frequência: 60Hz;

Enrolamento BT: 220 V – 13,6 A;

Enrolamento AT: 380 / 440 V – 7,9 / 6,8 A

Classe de Isolação: 1,6 kV;

Classe de Temperatura: 105°C;

Peso: 20 kg.

A Figura 20 mostra a imagem do transformador utilizado neste trabalho.

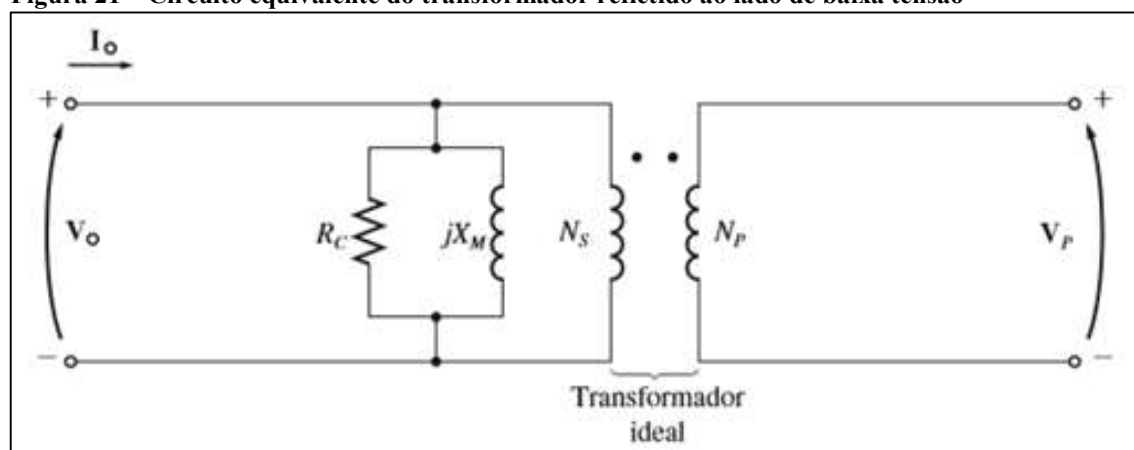
Figura 20 - Imagem real do transformador ensaiado



Fonte: Do autor

O ensaio a vazio foi realizado energizando o lado de baixa tensão, aplicando a tensão nominal do enrolamento, com os terminais de alta tensão em aberto. O objetivo deste ensaio é encontrar a potência a vazio e corrente a vazio, e com estes valores determinar os parâmetros do ramo de magnetização, R_C , X_m , I_{rmag} , I_{imag} , referidos ao lado de baixa tensão, como mostra a Figura 21.

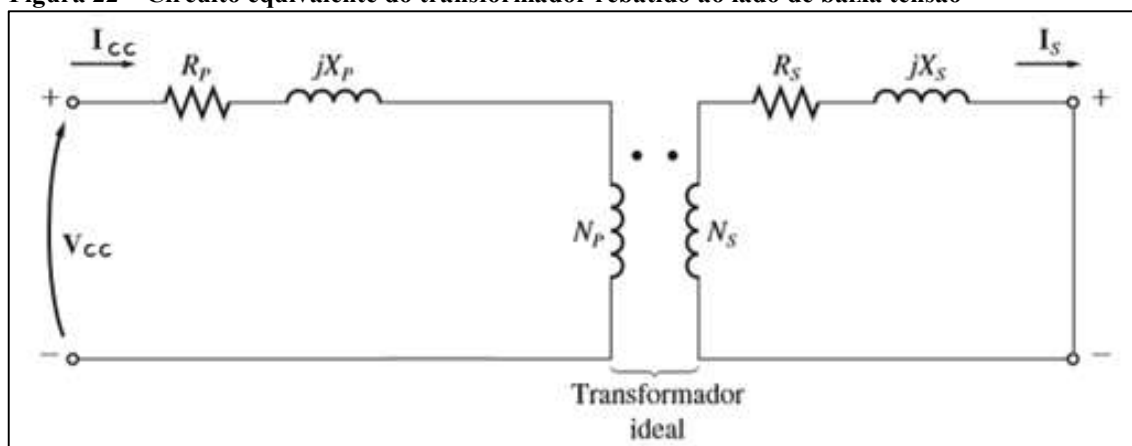
Figura 21 – Circuito equivalente do transformador refletido ao lado de baixa tensão



Fonte: Adaptado de Chapman (2013)

O ensaio de curto-circuito foi realizado energizando o lado de alta tensão, ajustando a tensão, através do variador de tensão, até obter a corrente nominal do lado ensaiado, com os terminais de baixa tensão curto-circuitados. O objetivo deste ensaio é encontrar a potência de curto-circuito, tensão de curto-circuito, e com estes valores determinar os parâmetros, de transformador, fator de potência de curto-circuito, impedância, resistência, reatância primária e secundária, e impedância, resistência, reatância percentual. Os valores aqui determinados são referidos ao lado de alta e baixa tensão, como mostra a Figura 22.

Figura 22 – Circuito equivalente do transformador rebatido ao lado de baixa tensão



Fonte: Adaptado de Chapman (2013)

3.2 Modelo computacional

Para o modelo de transformador apresentado neste trabalho foram utilizados três recursos de modelagem, a linguagem MODELS, os blocos TACS e os modelos existentes no ATPDraw, poderiam ser usados mais recursos, ou apenas um destes, mas a ideia foi a de apresentar a flexibilidade do software, quanto aos recursos disponíveis.

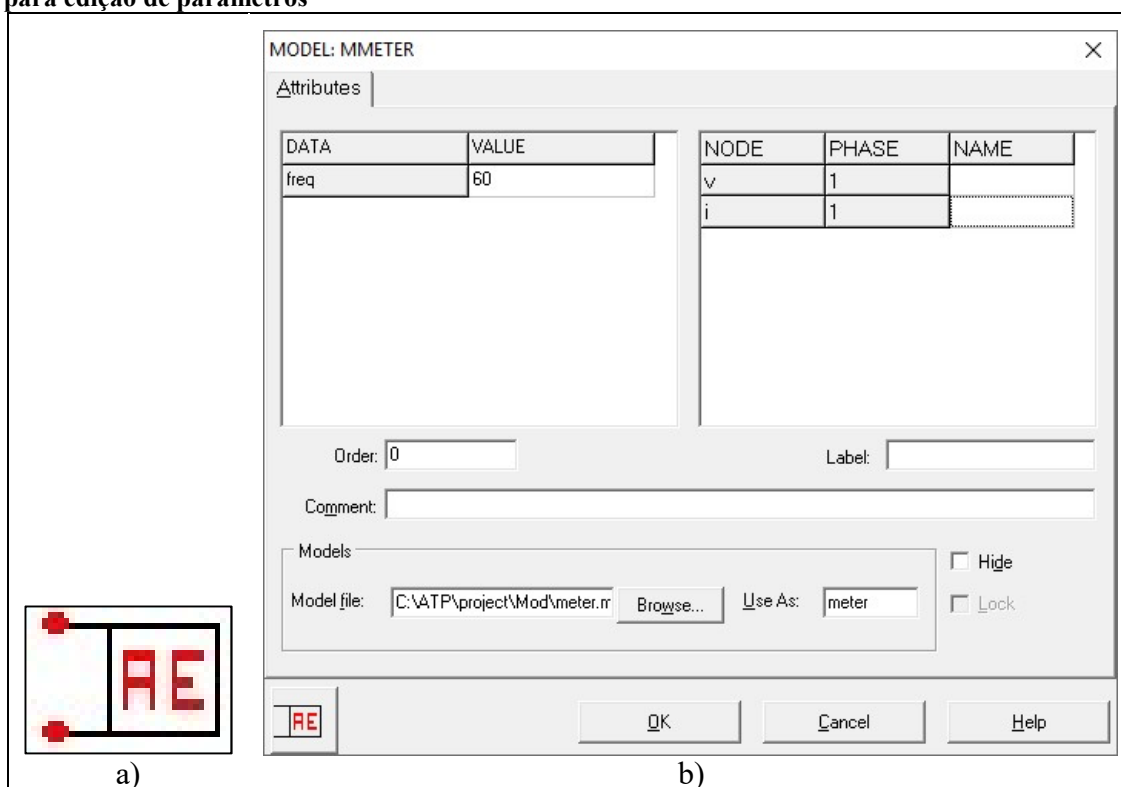
3.2.1 Linguagem MODELS

O componente apresentado na Figura 23-a é um bloco criado através da linguagem MODELS e arquivo de suporte, recebe os valores de tensão e corrente, do sistema a ele conectado, e calcula os valores de raiz média quadrada (RMS) de tensão e corrente, a potência aparente, e potência ativa do sistema.

A inscrição dentro do bloco, é opcional, mas ajuda a diferenciá-lo dos demais, “AE” é uma referência a analisador de energia. O bloco é composto de um arquivo tipo .MOD, e .SUP, explicado no tópico 2.2.2.1.

Dando dois cliques sobre o bloco, é possível acessar os atributos do modelo, apresentado na Figura 23-b, onde ficam as variáveis que podem ser alterados pelo usuário, neste bloco o único parâmetro a ser modificado é a frequência, que deve ser a mesma do sistema analisado.

Figura 23 – Modelo criado na MODELS, a) modelo compacto do bloco, b) estrutura interna do bloco para edição de parâmetros



Fonte: Do autor

A seguir estão as instruções do código criado para o modelo da Figura 23. Os dados de entrada são a corrente e tensão de fase, pico a pico (v, i), e a saída são, tensão e corrente de fase RMS (vrms, irms) e potência aparente e ativa (S, P).

```
BEGIN NEW DATA CASE
MODEL meter
COMMENT -- comentários
    Medidor monofásico de tensão e corrente rms; potência ativa e aparente.
ENDCOMMENT
DATA -- dados de entrada
    freq {DFLT: 60}      -- Hz
INPUT
    v      -- Tensão no nó no qual o medidor estão conectado (fase terra ATP) [V]
    i      -- corrente no nó ( este não deve pertencer a uma chave) [A].
VAR
    S      -- potência aparente [VA]
    P      -- potência ativa [W]
    vrms   -- valor rms da tensão [V]
```

```

        irms    -- valor rms da corrente [A]
        v2      -- valor instantâneo da tensão ao quadrado
        i2      -- valor instantâneo da corrente ao quadrado
        vi      -- potência aparente instantânea ( $v \cdot i$ )
        iv2     -- integral de v2
        ii2     -- integral de i2
        ivi     -- integral de vi
        period  -- período da onda de tensão [s]
        Timestep MIN: 1e-5
DELAY
        CELLS(iv2):1/freq/timestep +1
        CELLS(ii2):1/freq/timestep +1
        CELLS(iv):1/freq/timestep +1
INIT    -- condições iniciais das variáveis
        S:=0
        P:=0
        integral(v2):=0
        integral(i2):=0
        integral(vi):=0
        histdef(iv2):=0
        histdef(ii2):=0
        histdef(iv):=0
        histdef(integral(v2)):=0
        histdef(integral(i2)):=0
        histdef(integral(vi)):=0
        period:=recip(freq)
ENDINIT
EXEC
__ *****
__    Cálculos iniciais
__ *****
        v2:=v*v
        i2:=i*i
        vi:=v*i
        iv2:=integral(v2)
        ii2:=integral(i2)
        ivi:=integral(vi)
__ *****
__    Valor rms da tensão e corrente
__ *****
        vrms:=sqrt((iv2-delay(iv2,period))/period)
        irms:=sqrt((ii2-delay(ii2,period))/period)
__ *****
__    Potência aparente
__ *****
        S:=vrms*irms
__ *****
__    Potência Ativa
__ *****
        P:=(ivi-delay(ivi,period))/period
        if P >= S then
            P:=S
        endif
__ *****
__    Potência Reativa

```

```

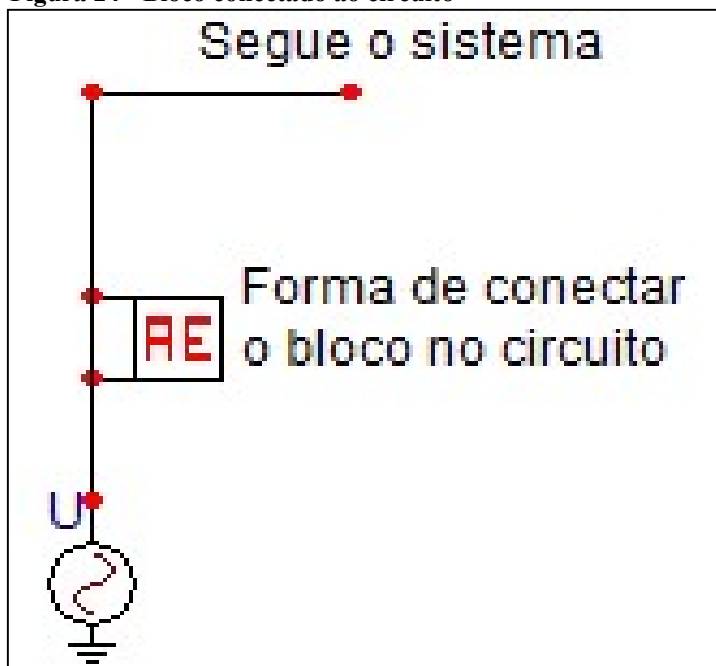
-- *****
-- *****
-- Fator de Potência
-- *****
ENDEXEC
ENDMODEL
RECORD
    meter.S as S
    meter.P as P
    meter.vrms as vrms
    meter.irms as irms

```

Das informações no código MODELS apresentado, as instruções após “--, C” estão comentadas, e não fazem parte do modelo.

A Figura 24 apresenta a forma de conectar o bloco ao sistema:

Figura 24 - Bloco conectado ao circuito



Fonte: Software ATPDraw

3.2.2 TACS

Os blocos de modelos TACS fazem parte da biblioteca do ATPDraw, é possível fazer a combinação entre eles e o restante do sistema para obter o resultado desejado. Neste trabalho foram utilizados os blocos apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Relação de blocos TACS utilizados no modelo de transformador

OPERAÇÃO	NOME	ÍCONE	DESCRIÇÃO
Acoplamento ao circuito	EMTP_OUT		Responsável por transmitir informações do circuito aos demais blocos TACS
Geral	FORTTRAN1		Expressão FORTRAN especificada pelo usuário
Entrada IF-60	DEVICE60		Componente de entrada-IF
Medidor de RMS - 66	DEVICE66		Valor RMS da soma dos sinais de entrada
$x - y$	DIFF2		Subtração de dois sinais de entrada
$x * K$	MULTK		Multiplca o sinal de entrada por um fator K
$x * y$	MULT2		Multiplca dois sinais de entrada
x / y	DIV2		Relação entre dois sinais de entrada
$\sqrt{x}$	SQRT		Raiz quadrada do sinal de entrada

Fonte: Adaptado do manual ATPDraw, versão 5.6

3.2.3 Modelos de componentes do ATPDraw

Os modelos disponíveis no software, e utilizados na construção do circuito equivalente do transformador e saída de sinal para plotagem, estão apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 - Relação de blocos da biblioteca ATPDraw utilizados no modelo de transformador

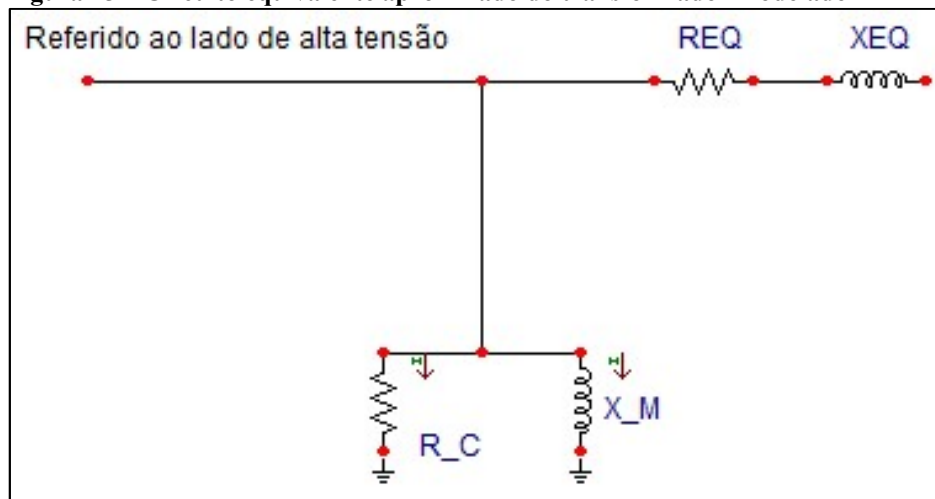
OPERAÇÃO	NOME	ÍCONE	DESCRIÇÃO
Saída de sinal para plotagem gráfica	Probe TACS		Especifica a saída do sinal e insere o objeto TACS no arquivo ATP.
Comutação	SWITCHTC		Chave monofásica controlada por tempo
Resistor	RESISTOR		Resistência pura em ohms
Indutor	INDUCTOR		Indutor com resistor de amortecimento. Indutância em mH se $X_{opt} = 0$

Fonte: Adaptado do manual ATPDraw, versão 5.6

3.2.4 Transformador modelado

A Figura 25 apresenta o circuito equivalente utilizado no modelo proposto, referido ao lado de alta tensão. Nas simulações, a carga deve ser referida ao lado de alta, através da relação de transformação elevada ao quadrado. A partir deste circuito, começou a implementar o modelo, através dos recursos estudados nos tópicos anteriores.

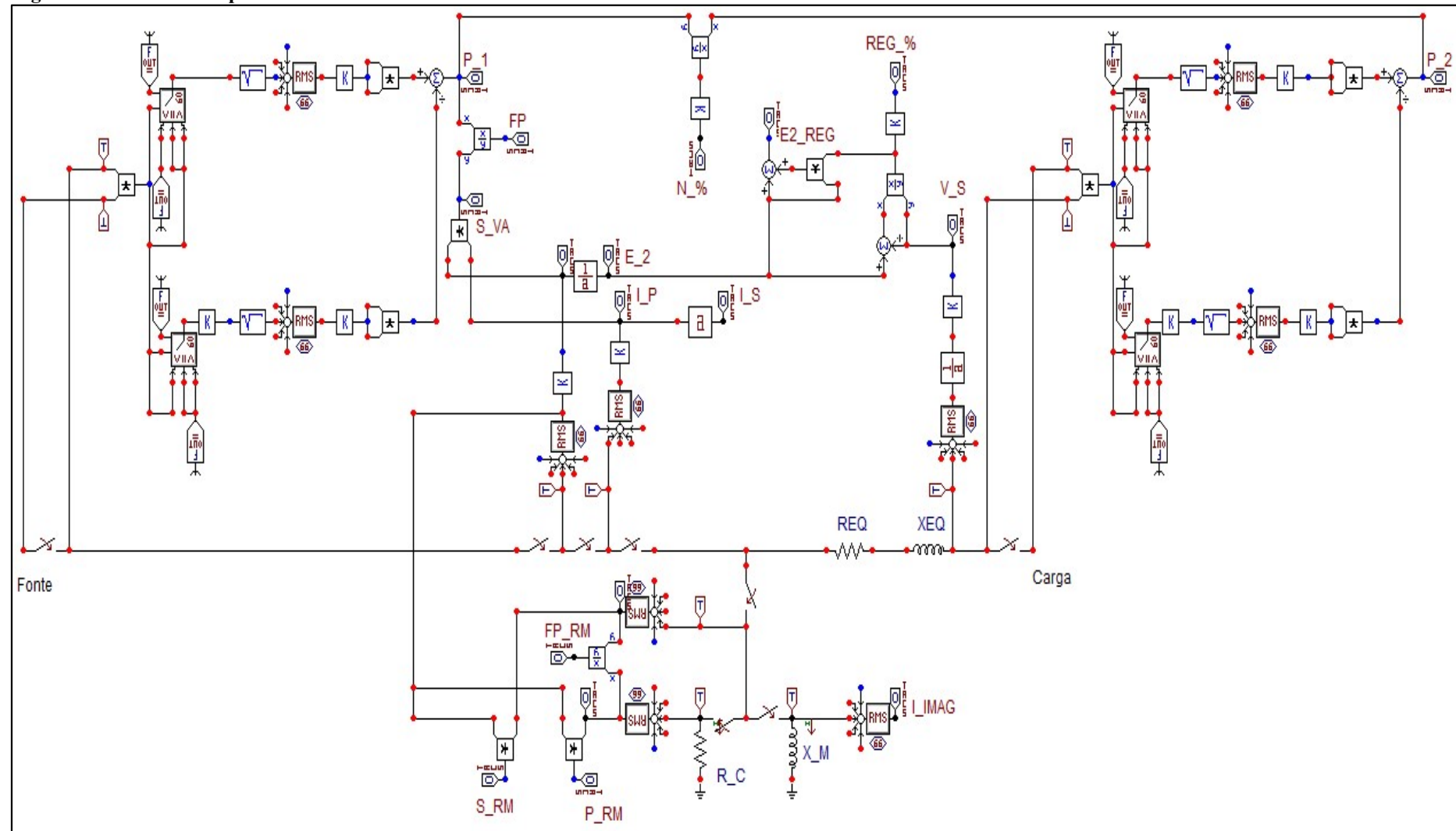
Figura 25 – Circuito equivalente aproximado do transformador modelado



Fonte: Software ATPDraw

A Figura 26 apresenta a modelagem completa do transformador monofásico proposto neste trabalho.

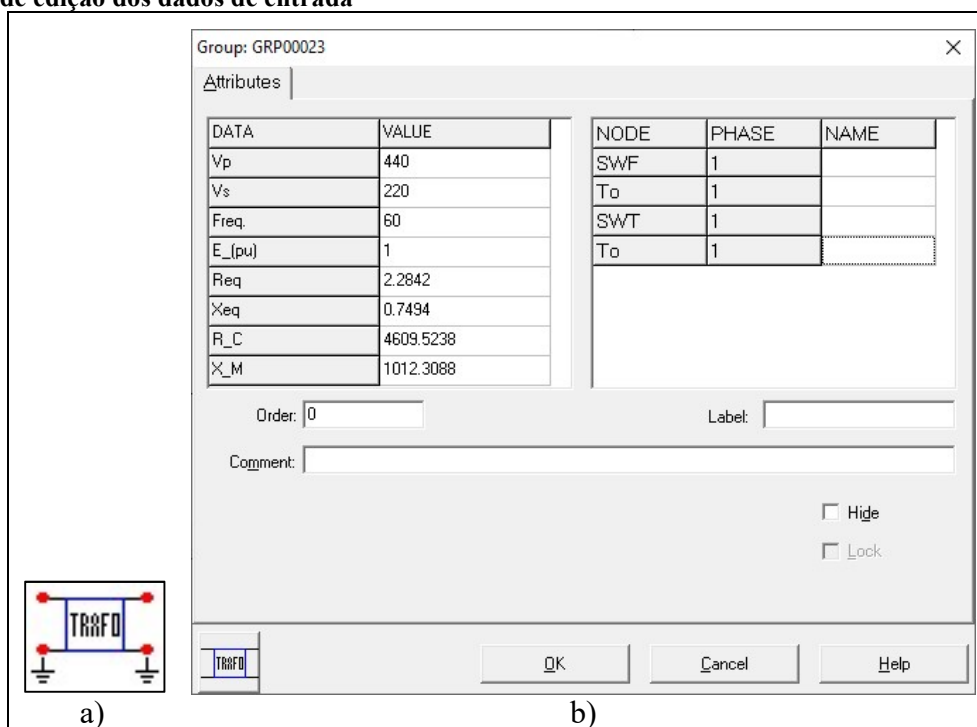
Figura 26 – Modelo computacional de transformador monofásico



Fonte: Do autor

Um recurso adicional oferecido pelo software ATPDraw é a possibilidade de transformar todo o circuito em um único bloco, ou seja, se o sistema modelado é composto por varios modelos de componentes, como o mostrado na Figura 26, o usuário pode torná-lo mais amigável e prático. O comando comprimir, em “Edit/compress” transforma todo o modelo em um ícone, onde os dados e nós externos são selecionados pelo usuário. O modelo final deste trabalho está representado na Figura 27-a e os parâmetros disponíveis para edição durante a simulação em 27-b.

Figura 27 – Transformador modelado, a) modelo compacto do transformador, b) janela de edição dos dados de entrada



Fonte: Adaptado de Software ATPDraw

Os dados de entrada são:

Vp – tensão nominal primária do transformador;

Vs – tensão nominal secundário do transformador;

Freq – frequência do sistema simulado, fonte;

E_(pu) – valor de E_2, em pu, a ser inserido no modelo, para obter a tensão nominal no secundário, obtido a partir da regulação de tensão;

$$E_{pu} = 1 + REG\%$$

Req – resistência série equivalente;

Xeq – reatância série equivalente;

R_C – resistência do ramo de magnetização;

X_M – reatância do ramo de magnetização.

Os dados de saída são:

I_{RC} – corrente senoidal ativa do ramo de magnetização;

I_M – corrente senoidal reativa do ramo de magnetização;

FP_{RM} – fator de potência do ramo magnetizante;

P_{RM} – potência ativa do ramo magnetizante;

S_{RM} – potência aparente do ramo magnetizante;

P_1 – potência de entrada;

E_2 – tensão induzida no enrolamento secundário;

V_P – tensão nos terminais primário;

V_S – tensão no terminal secundário;

I_S – corrente secundário;

$REG\%$ – regulação de tensão;

I_P – corrente no primário;

$E2_{REG}$ – tensão E_2 a ser induzida no secundário;

I_{RMAG} – corrente RMS ativa no ramo de magnetização;

I_0 – corrente de magnetização;

FP – fator de potência;

I_{IMAG} – corrente RMS reativa do ramo de magnetização;

P_2 – potência de saída;

$N\%$ – rendimento;

S_{VA} – potência aparente;

S – potência aparente, para $E_{(pu)} = 1$;

P – potência ativa, para $E_{(pu)} = 1$;

$VRMS$ – tensão RMS, para $E_{(pu)} = 1$;

$IRMS$ – corrente RMS, para $E_{(pu)} = 1$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Transformador real ensaiado

4.1.1 Ensaio a vazio

O ensaio a vazio foi realizado no lado de baixa tensão, aplicando a tensão nominal nos terminais do secundário do transformador. Os valores, de raiz média quadrada (RMS), deste ensaio foram:

$$V_0 = V_n = 220 \text{ V}$$

$$I_0 = 0,89 \text{ A}$$

$$P_0 = 42 \text{ W}$$

$$a = 2, \text{ relação de transformação}$$

O wattímetro mede a potência ativa consumida, da equação (12), obtém-se a componente ativa da corrente I_0 :

$$I_{rmag} = \frac{P_0}{V_n}$$

$$I_{rmag} = \frac{42}{220}$$

$$I_{rmag} = 0,1909 \text{ A}$$

Componente reativa de I_0 , equação (13):

$$I_{imag} = \sqrt{0,89^2 - 0,1909^2}$$

$$I_{imag} = 0,8693 \text{ A}$$

Fator de potência a vazio FP , equação (14):

$$FP = \cos\varphi = \frac{42}{220 * 0,89}$$

$$FP = 0,2145$$

Resistência de magnetização R_c , equação (16):

$$R_c = \frac{V_n^2}{P_0}$$

$$R_c = \frac{220^2}{42}$$

$$R_c = 1152,3809 \Omega$$

Reatância de magnetização X_m , equação (18):

$$X_m = \frac{V_n}{I_{imag}}$$

$$X_m = \frac{220}{0,8693}$$

$$X_m = 253,0772 \, \Omega$$

Todos os valores calculados são relativos ao lado de baixa tensão, lado do ensaio a vazio.

O Quadro 3 apresenta todos os parâmetros a vazio ensaiados e calculados, para o lado de alta e baixa tensão do transformador.

Quadro 3 - Resumo do ensaio a vazio

GRANDEZAS	ALTA TENSÃO	BAIXA TENSÃO
Potência aparente a vazio	195,8 W	
Potência a vazio	42 W	
Corrente a vazio	0,445 A	0,89 A
Fator de Potência a vazio	0,2145	
Resistência de magnetização	4609,5238 Ω	1152,3809 Ω
Reatância de magnetização	1012,3088 Ω	253,0772 Ω
Corrente ativa de magnetização	0,09545 A	0,1909 A
Corrente reativa de magnetização	0,43465 A	0,8693 A

Fonte: Do autor

4.1.2 Ensaio de curto-circuito

O ensaio de curto-circuito foi realizado no lado de alta tensão, ou seja, a baixa tensão foi curto-circuitada e aplicada uma tensão ajustável no lado de alta, até obter a corrente nominal daquele enrolamento, os valores, RMS deste ensaio foram:

$$V_{cc} = 16,3 \, V$$

$$I_{cc} = 6,78 \, A$$

$$P_0 = 105 \, W$$

$$I_s = 13,56 \, A$$

$a = 2$, relação de transformação.

Com os valores em mãos, e as relações matemáticas entre elas, foi possível determinar os demais parâmetros do ensaio.

Fator de potência a vazio FP , equação (14):

$$FP = \cos\varphi = \frac{105}{16,3 * 6,78}$$

$$FP = 0,95$$

Impedância Z_{cc} , equação (19):

$$|Z_{cc}| = \frac{16,3}{6,78}$$

$$Z_{cc} = 2,404 \, \Omega$$

Resistências R_p , equação (26):

$$R_{eqp} = \frac{P_{cc}}{I_p^2}$$

$$R_{eqp} = \frac{105}{6,78^2}$$

$$R_{eqp} = 2,2842 \, \Omega$$

$$R_{eqp} = 2R_p$$

$$R_p = \frac{2,2842}{2}$$

$$R_p = 1,1421 \, \Omega$$

Resistência R_s , equação (27):

$$R_s = \frac{R_p}{a^2}$$

$$R_s = \frac{1,1421}{2^2}$$

$$R_s = 0,2855 \, \Omega$$

Reatâncias X_p , equação (29):

$$X_{eqp} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{eqp}^2}$$

$$X_{eqp} = \sqrt{2,404^2 - 2,2842^2}$$

$$X_{eqp} = 0,7494 \, \Omega$$

$$X_{eqp} = 2X_p$$

$$X_p = \frac{0,7494}{2}$$

$$X_p = 0,3747 \, \Omega$$

Reatâncias X_s , equação (30):

$$X_s = \frac{X_p}{a^2}$$

$$X_s = \frac{0,3747}{2^2}$$

$$X_s = 0,0937$$

Impedância $Z_{\%}$, equação (24):

$$Z_{\%} = \frac{V_{cc}}{V_n} 100$$

$$Z_{\%} = \frac{16,3}{440} 100$$

$$Z_{\%} = 3,7\%$$

Resistência percentual $R_{\%}$, equação (31):

$$R_{\%} = \frac{105}{3000} 100$$

$$R_{\%} = 3,5\%$$

Reatância percentual $X_{\%}$, equação (32):

$$X_{\%} = \sqrt{Z_{\%}^2 - R_{\%}^2}$$

$$X_{\%} = \sqrt{3,7^2 - 3,5^2}$$

$$X_{\%} = 1,5\%$$

Perdas no cobre P_{cu} , calculada, equação (23):

$$P_{cu} = R_p I_p^2 + R_s I_s^2$$

$$P_{cu} = 1,1421 * 6,78^2 + 0,2855 * 13,56^2$$

$$P_{cu} = 104,9996 \text{ W}$$

Considerando a precisão do instrumento, $P_{cu} = 105 \text{ W}$

O Quadro 4 apresenta todos os parâmetros ensaiados e calculados, para o lado de alta e de baixa tensão do transformador.

Quadro 4 – Resumo do ensaio de curto-circuito

Grandezas	Alta tensão	Baixa tensão
Potência aparente de curto circuito	110,51 W	
Potência de curto-circuito	105 W	
Tensão de curto-circuito	16,3 V	8,15 V
Corrente de curto-circuito	6,78 A	13,56 A
Fator de Potência de curto-circuito	0,95	
Impedância de curto-circuito	2,404 Ω	0,601 Ω
Impedância	1,202 Ω	0,3 Ω
Resistência	1,1421 Ω	0,2855 Ω
Reatância	0,3747 Ω	0,0937 Ω
Impedância percentual	3,7%	
Resistência percentual	3,5%	
Reatância percentual	1,5%	

Fonte: Do autor

4.2 Simulação computacional

Esta seção apresenta a simulação do ensaio a vazio e de curto-circuito, com as impedâncias levantadas nos ensaios em laboratório e os exemplos encontrados no livro de fundamentos de máquinas elétricas, Chapman (2013, p.92-94), e compara os resultados entre os ensaios reais e teóricos, com os de simulações computacional.

Para as simulações realizadas, as variáveis de entrada foram as resistências e reatâncias séries equivalentes, a resistência e reatância do ramo de magnetização, todas referidas ao primário do transformador.

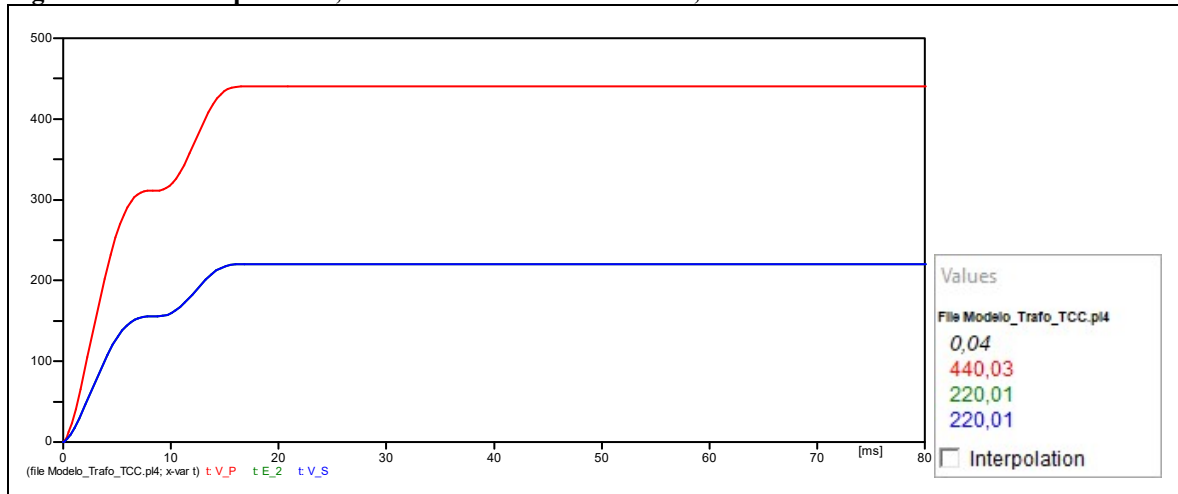
4.2.1 Simulação com os parâmetros reais

Com os valores das impedâncias, determinados pelo ensaio a vazio do transformador, foi realizada a simulação deste no modelo criado. Os ensaios em laboratório são realizados no lado de baixa tensão, já a simulação aqui apresentada, é realizada no lado de alta, sendo esta uma vantagem em relação ao ensaio em transformadores reais, pois tanto o operador, quanto os equipamentos não estão expostos a riscos de acidentes. Os valores são referidos a baixa tensão, pela relação de transformação.

4.2.1.1 Simulação a vazio

Os resultados estão representados na forma de gráficos, nas Figuras 28, 29 e 30. Na parte inferior dos gráficos estão as legendas de cada elemento, representado com cores que identificam suas respectivas curvas e os valores das grandezas a direita do gráfico. No eixo horizontal é representado a linha do tempo em milissegundos, no eixo vertical a magnitude das grandezas referentes a curva analisada, podendo ser representado curvas com unidades de grandezas diferentes.

A Figura 28 apresenta os gráficos da tensão aplicada no primário do transformador modelado, da tensão induzida no secundário e da tensão nos terminais do enrolamento secundário. Como o transformador está a vazio, a tensão nos terminais do secundário é igual a tensão induzida no enrolamento secundário, por esta razão, a curva de cor azul está sobreposta ao de cor verde. A tensão aplicada nos terminais do primário foi de 622,25 V pico, fase neutro, pois a fonte fornece o valor de pico, porém, os valores de saída do modelo são RMS.

Figura 28 – Tensão primária, tensão induzida no secundário, tensão nos terminais secundário

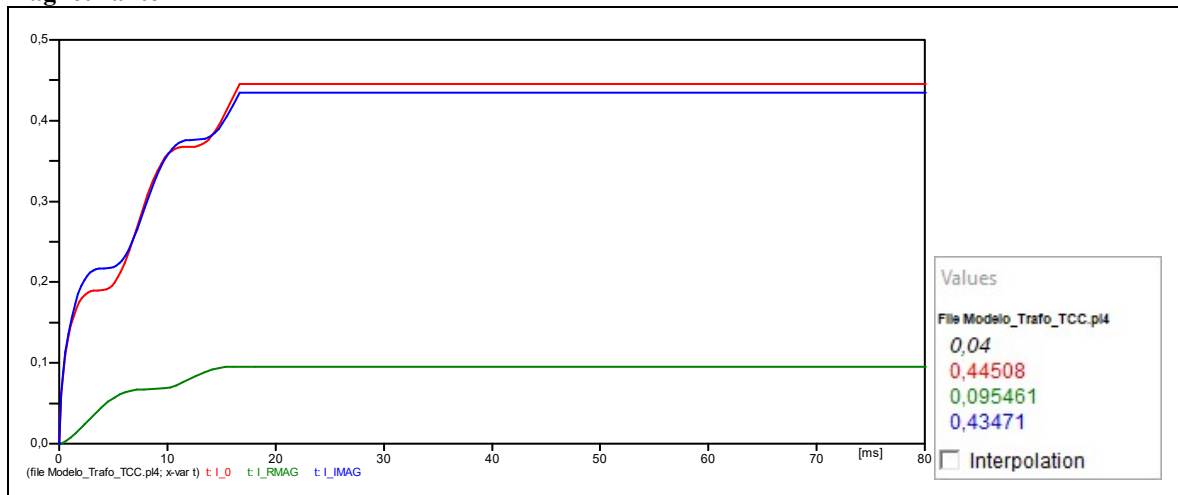
Fonte: Software ATPDraw.

$V_P = 440,03 \text{ V}$, tensão aplicada no primário do transformador.

$E_2 = 220,01 \text{ V}$, tensão induzida no secundário.

$V_S = 220,01 \text{ V}$, tensão nos terminais do secundário.

A Figura 29 apresenta os resultados da simulação para corrente a vazio, corrente ativa do ramo magnetizante, corrente reativa do ramo magnetizante.

Figura 29 – Corrente a vazio, corrente ativa do ramo magnetizante, corrente reativa do ramo magnetizante

Fonte: Software ATPDraw.

$I_0 = 0,44508 \text{ A}$, corrente a vazio no primário.

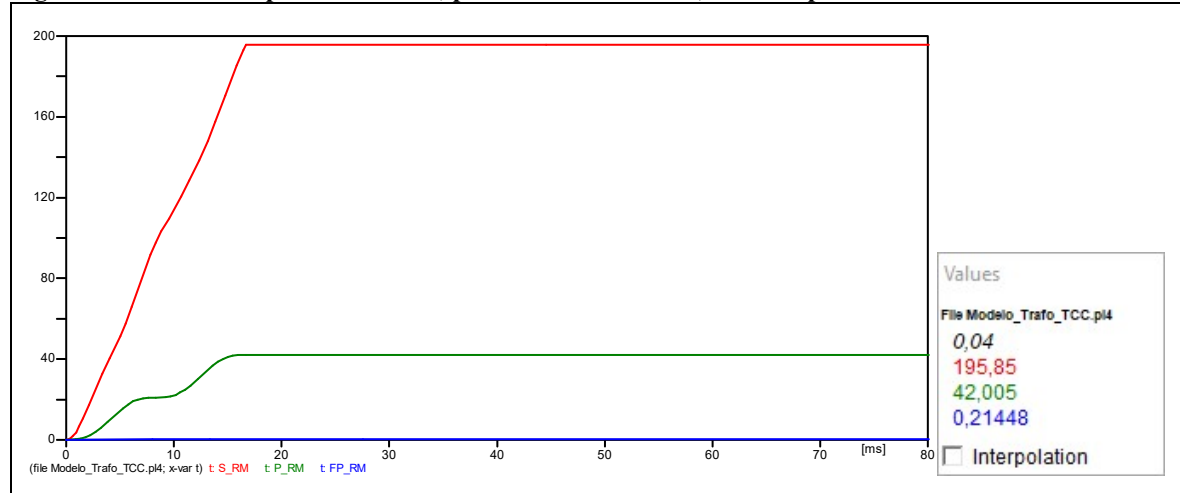
$I_{0S} = 0,89016 \text{ A}$, corrente a vazio refletida ao secundário.

$I_{rmag} = 0,095461 \text{ A}$, corrente ativa de magnetização.

$I_{imag} = 0,43471 \text{ A}$, corrente reativa de magnetização.

A Figura 30 apresenta os gráficos da potência aparente, consumida no ensaio a vazio pelo ramo de magnetização do transformador modelado, da potência ativa, referente as perdas no núcleo e do fator de potência.

Figura 30 – Potência aparente a vazio, potência ativa a vazio, fator de potência a vazio



Fonte: Software ATPDraw.

$S_{RM} = 195,85 \text{ VA}$, potência aparente no ramo de magnetização.

$P_{RM} = 42,005 \text{ W}$, potência ativa dissipada no núcleo do transformador.

$FP_{RM} = 0,21448$, fator de potência a vazio.

O Quadro 5 traz a comparação entre valores calculados a partir dos ensaios em laboratórios e os valores encontrados na simulação, assim como o erro relativo. Para o cálculo do erro relativo foi utilizado a seguinte expressão:

$$erro_{\%} = \frac{|valor_{real} - valor_{simulado}|}{valor_{real}} 100$$

Quadro 5 – Resultados e comparação entre os valores obtidos através do ensaio e vazio e os obtidos através de simulações

Grandezas	Ensaio	Simulação	Erro relativo
Corrente a vazio primário	0,445 A	0,44508 A	0,018 %
Corrente a vazio secundário	0,89 A	0,89016 A	0,018 %
Corrente ativa de magnetização primário	0,09545 A	0,095461 A	0,012 %
Corrente reativa de magnetização secundário	0,43465 A	0,43471 A	0,014 %
Tensão no primário	440 V	440,03 V	0,007 %
Tensão induzida no secundário	220 V	220,01 V	0,005 %
Tensão nos terminais do secundário	220 V	220,01 V	0,005 %
Potência aparente no ramo de magnetização	195,8 VA	195,85 VA	0,026 %
Potência ativa no ramo de magnetização	42 W	42,005 W	0,012 %
Fator de potência a vazio	0,2145	0,21448	0,009 %

Fonte: Do autor

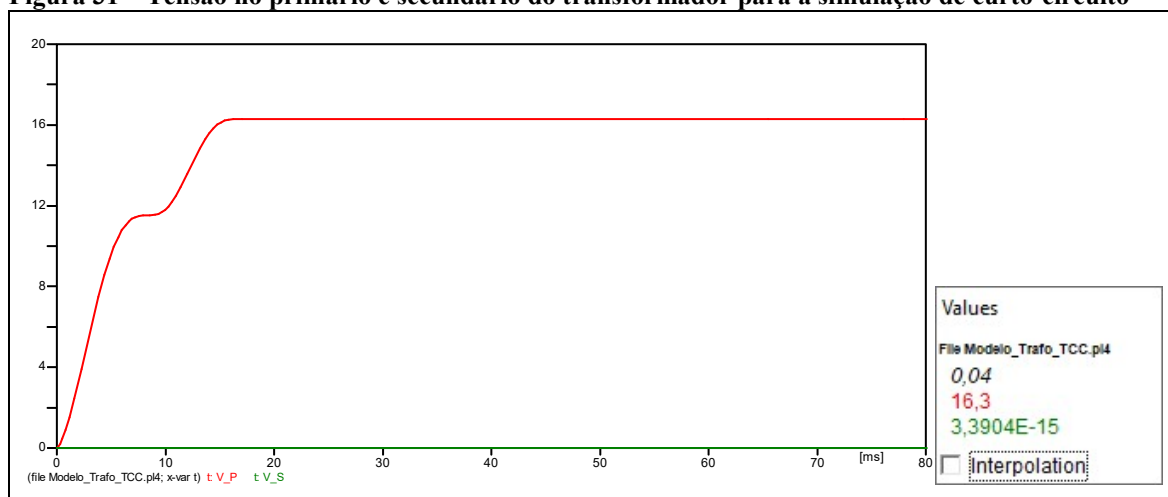
Analisando os dados do Quadro 5, na coluna de erro relativo, é possível inferir que a diferença entre os valores, ensaiados e simulados, são insignificantes para os propósitos didáticos desta ferramenta aqui apresentada.

4.2.1.2 Simulação de curto-circuito

A simulação foi realizada aplicando a tensão de curto-circuito de 23,05 V de pico, fase e neutro, no primário do transformador modelado, estando o secundário ligado ao terra, através de uma resistência da ordem de E-15 (expressão no ATPDraw para notação de 10^{-1}). Os dados, obtidas através da simulação de curto-circuito, estão nas Figuras 31, 32 e 33.

A Figura 31 traz o valor de tensão RMS aplicada no enrolamento primário do transformador, o mesmo valor de tensão encontrado para se obter a corrente nominal no primário do transformador em laboratório.

Figura 31 – Tensão no primário e secundário do transformador para a simulação de curto-circuito



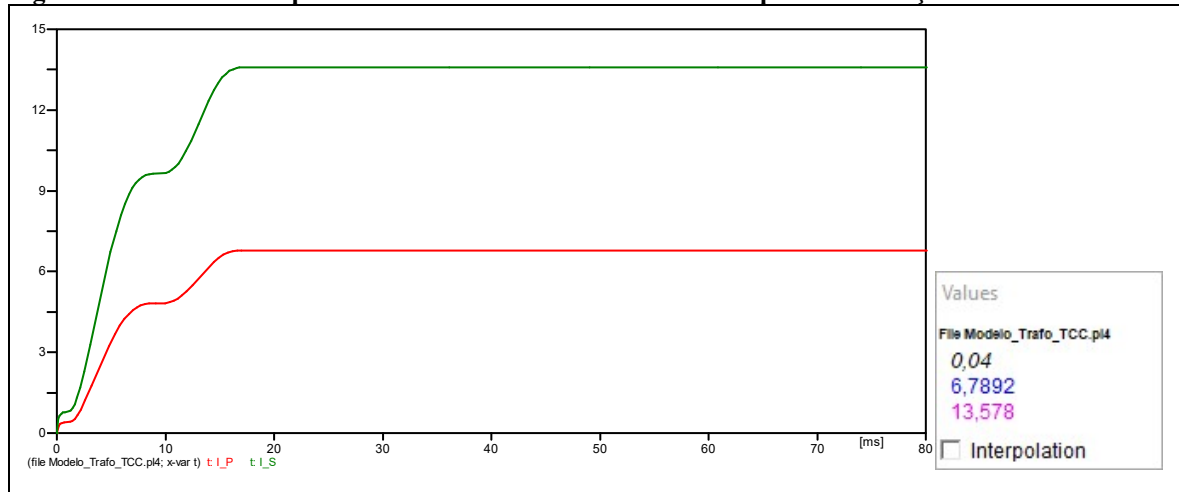
Fonte: Software ATPDraw

$V_p = V_{cc} = 16,3 \text{ V}$, tensão aplicada nos terminais primário do transformador.

$V_s = V_{cc} \cong 0 \text{ V}$, queda de tensão nos terminais do secundário.

Como era de se esperar, aplicando a tensão de curto-circuito, surgiria uma corrente de curto-circuito no enrolamento primário do transformador, a Figura 32 mostra o valor desta corrente, que é bem próxima do valor encontrado em laboratório, de 6,78 A.

Figura 32 – Corrente no primário e secundário do transformador para a simulação de curto-circuito



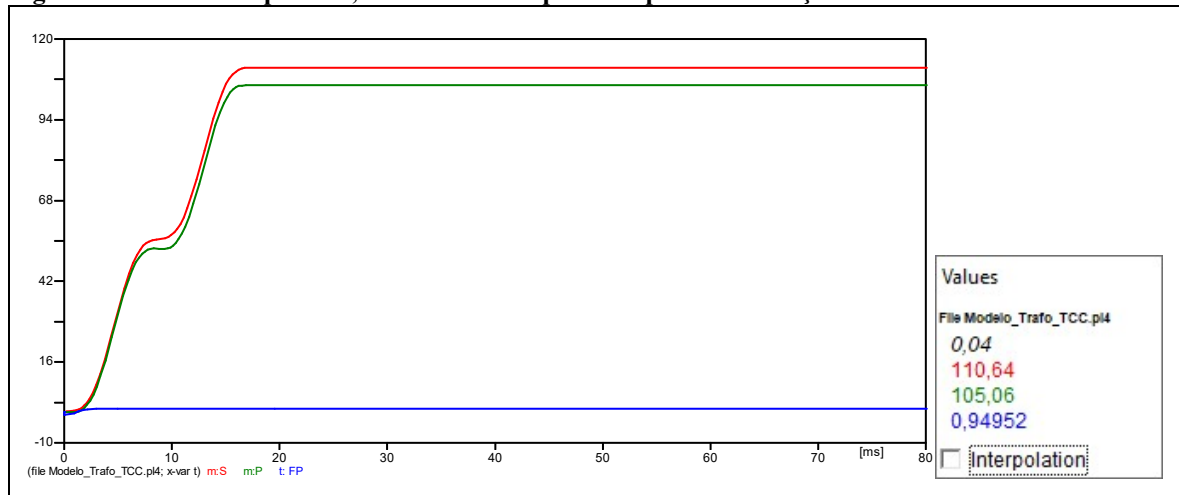
Fonte: Software ATPDraw

$I_p = I_{cc} = 6,7892 \text{ A}$, corrente de curto-circuito no primário.

$I_s = I_{cc} = 13,578 \text{ A}$, corrente de curto-circuito no secundário.

A Figura 33 apresenta os valores de potências aparente e ativa, além do fator de potência para o caso simulado. As potências dissipadas estão próximas dos valores calculados e medidos em laboratórios.

Figura 33 – Potência aparente, ativa e fator de potência para a simulação de curto-circuito



Fonte: Software ATPDraw

$S_{cc} = 110,64 \text{ VA}$, potência aparente de curto-circuito.

$P_{cc} = 105,06 \text{ W}$, potência ativa dissipada nas bobinas do transformador.

$FP = 0,94952$, fator de potência de curto-circuito.

Quadro 6 – Resultados e comparações entre os valores obtidos através do ensaio de curto-circuito e os obtidos através de simulações

Grandezas	Ensaio	Simulação	Erro relativo
Corrente de no primário	6,78 A	6,7892 A	0,136 %
Corrente de curto-circuito no secundário	13,56 A	13,578 A	0,133 %
Tensão nos terminais do primário	16,3 V	16,3 V	0,000 %
Tensão nos terminais do secundário	0 V	$\cong 0$ V	-
Potência aparente de curto-circuito	110,51 VA	110,64 VA	0,118 %
Potência ativa de curto-circuito	105 W	105,06 W	0,057 %
Fator de potência de curto-circuito	0,95	0,94952	0,051 %

Fonte: Do autor

Analisando os dados do Quadro 6, na coluna do erro relativo, é possível inferir que a diferença entre os valores ensaiados e simulados, apesar de serem maiores que no ensaio a vazio, ainda assim são desprezíveis para os propósitos didáticos.

4.2.2 Simulação com parâmetros teóricos

Os dados teóricos para esta simulação foram obtidos no exemplo 2.2 do livro Chapman 5ª edição de 2013, páginas 92 a 94, onde para um determinado transformador, a partir de ensaios a vazio e de curto-circuito foram obtidas as impedâncias do circuito equivalente. Em posse dos parâmetros deste transformador, foram realizadas as simulações, afim de comparar os valores simulados com os valores apresentados no livro e verificar se o modelo apresentado atende a outro transformador.

Transformador:

20 kVA, 8.000/240 V e 60 Hz;

$a = 33,333$;

$R_{eq} = 38,4 \Omega$;

$X_{eq} = 192 \Omega$;

$R_c = 159996,8 \Omega$;

$X_m = 38477 \Omega$.

Aos valores de R_c e X_m aqui apresentados, não foram feitos os arredondamentos no resultado final, como apresentados no livro. O Quadro 7 mostra os dados apresentados no livro, e o objetivo com a simulação e encontrar estes mesmo valores.

Quadro 7 – Ensaio de curto-circuito e a vazio, livro Chapman (2013)

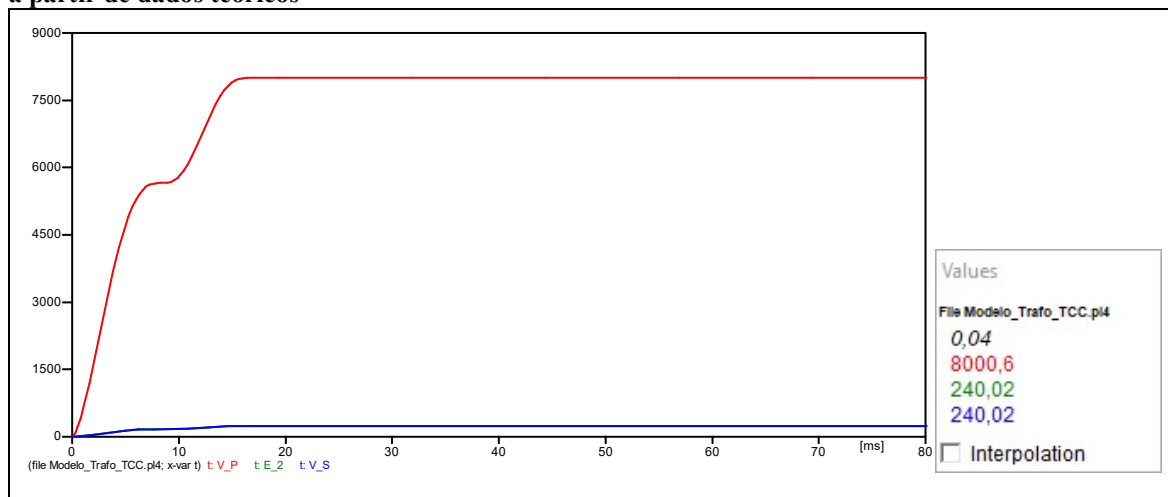
Ensaio a vazio (no secundário) $V_2 = 240$ V $I_{0s} = 7,133$ A $P_{RM} = 400$ W	Ensaio de curto-circuito (no primário) $V_{cc} = 489$ V $I_{cc} = 2,5$ A $P_{cc} = 240$ W
---	--

Fonte: Adaptado de Chapman (2013)

4.2.2.1 Simulação a vazio

As simulações foram realizadas no primário do transformador, os resultados estão nas Figuras 34, 35 e 36. Foi aplicada uma tensão de 11313,71 V de pico, fase e neutro, (8000 V RMS), no enrolamento primário, os dados de saída são todos valores RMS.

Figura 34 – Tensão primária, tensão induzida no secundário, tensão nos terminais secundário, simulados a partir de dados teóricos



Fonte: Software ATPDraw

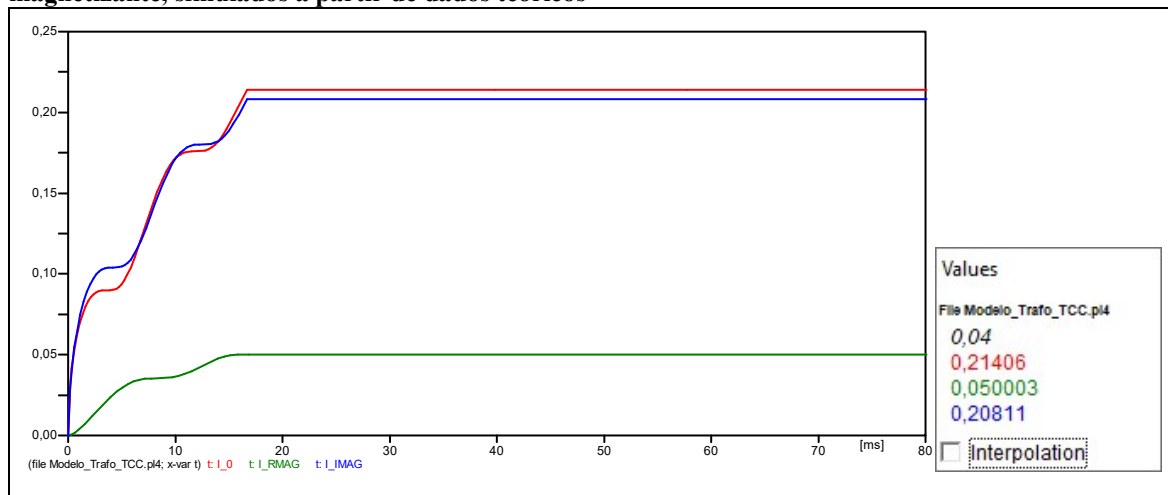
$V_P = 8000,6 \text{ V}$, tensão aplicada no primário do transformador.

$E_2 = 240,02 \text{ V}$, tensão induzida no secundário.

$V_s = 240,02 \text{ V}$, tensão nos terminais do secundário.

O gráfico na Figura 35 apresenta os valores de corrente a vazio total, corrente ativa e reativa do ramo de magnetização, referidas ao primário, para comparar a corrente a vazio da simulação com o valor do livro, basta aplicar a relação de transformação.

Figura 35 – Corrente a vazio, corrente ativa do ramo magnetizante, corrente reativa do ramo magnetizante, simulados a partir de dados teóricos



Fonte: Software ATPDraw

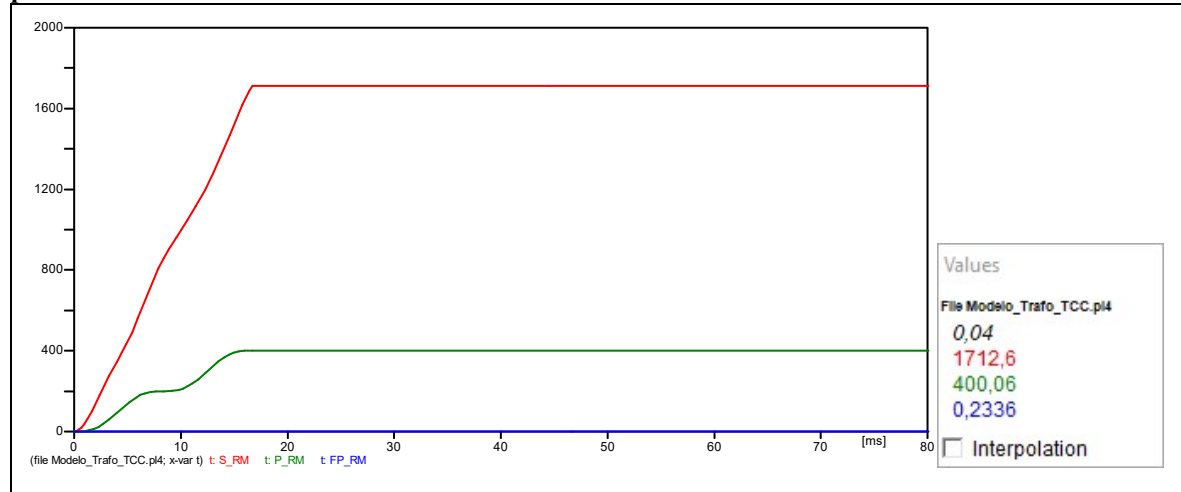
$I_0 = 0,21406 \text{ A}$, corrente a vazio no primário.

$I_{0s} = 7,135 \text{ A}$, corrente a vazio refletida ao secundário.

$I_{rmag} = 0,050003 \text{ A}$, corrente ativa de magnetização.

$I_{imag} = 0,20811 \text{ A}$, corrente reativa de magnetização.

Figura 36 – Potência aparente a vazio, potência ativa a vazio, fator de potência a vazio, simulados a partir de dados teóricos



Fonte: Software ATPDraw

$S_{RM} = 1712,6 \text{ VA}$, potência aparente no ramo de magnetização.

$P_{RM} = 400,06 \text{ W}$, potência ativa dissipada no núcleo do transformador.

$FP_{RM} = 0,2336$, fator de potência a vazio.

O Quadro 8 traz a comparação entre os dados apresentados no livro e a simulação a partir das impedâncias equivalentes daquele transformador, onde é possível observar a diferença dos valores encontrados através do software ATP/ATPDraw. Os valores apresentados na coluna de “dados do livro”, mas que não constam diretamente no livro, foram calculados através dos valores ali apresentados, por exemplo, potência aparente a vazio, correntes do ramo de magnetização ativa e reativa.

Quadro 8– Resultados e comparação entre os valores extraídos do livro e os obtidos através de simulações, para o teste a vazio

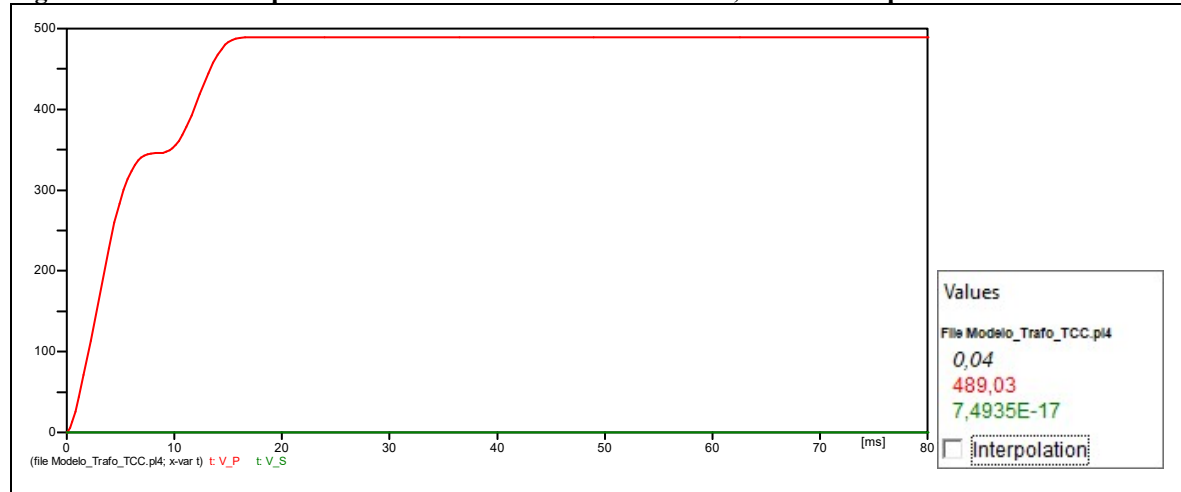
Grandezas	Dados do livro	Simulação	Erro relativo
Corrente a vazio primário	0,214 A	0,21406 A	0,028 %
Corrente a vazio secundário	7,133 A	7,135 A	0,028 %
Corrente ativa de magnetização primário	0,05 A	0,05 A	0,000 %
Corrente reativa de magnetização secundário	0,208 A	0,20811 A	0,053 %
Tensão no primário	8000 V	8000,6 V	0,008 %
Tensão induzida no secundário	-	240,02 V	-
Tensão nos terminais do secundário	240 V	240,02 V	0,008 %
Potência aparente no ramo de magnetização	1712 VA	1712,6 VA	0,035 %
Potência ativa no ramo de magnetização	400 W	400,06 W	0,015 %
Fator de potência a vazio	0,234	0,2336	0,171 %

Fonte: Do autor

4.2.2.2 Ensaio de curto-circuito

O ensaio de curto-circuito é realizado do lado de alta tensão, assim como na simulação aqui apresentada através de gráficos nas Figuras 37, 38 e 39, a tensão aplicada foi de 691,55 V de pico, fase e neutro, (489 V RMS), no enrolamento primário, e os dados de saída são todos RMS.

Figura 37 – Tensão no primário e secundário do transformador, simuladas a partir de dados teóricos

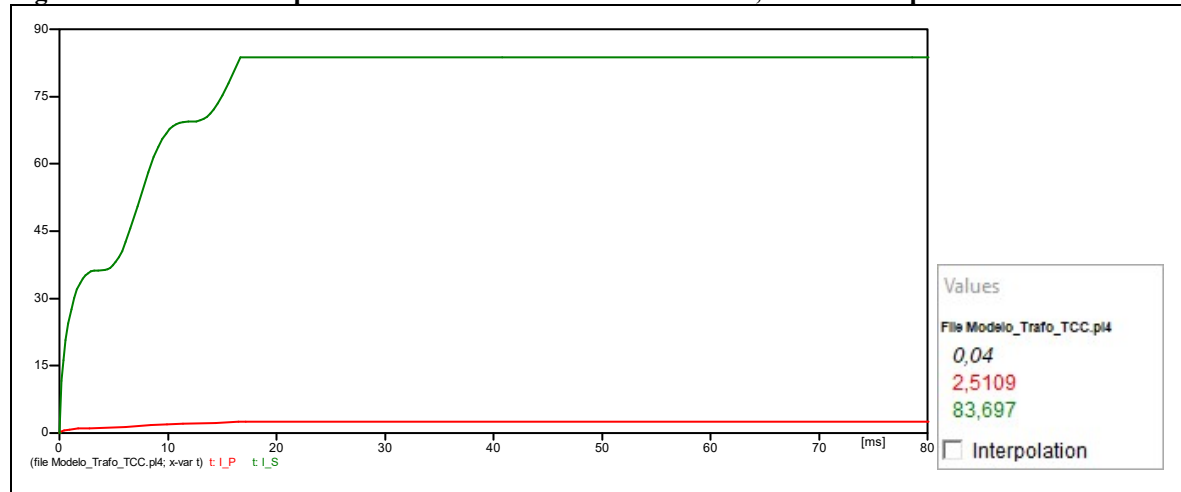


Fonte: Software ATPDraw

$V_p = V_{cc} = 489,03 \text{ V}$, tensão aplicada nos terminais primário do transformador.

$V_s = V_{cc} \cong 0 \text{ V}$, queda de tensão nos terminais do secundário.

Figura 38 – Corrente no primário e secundário do transformador, simuladas a partir de dados teóricos

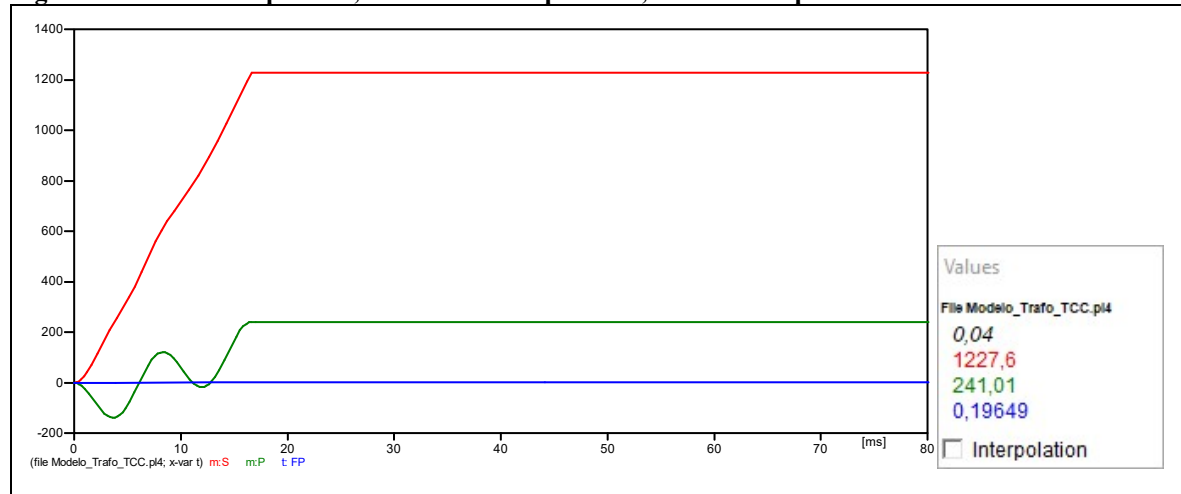


Fonte: Software ATPDraw

$I_p = I_{cc} = 2,5109 \text{ A}$, corrente de curto-circuito no primário.

$I_s = I_{cc} = 83,697 \text{ A}$, corrente de curto-circuito no secundário.

A Figura 39 apresenta os valores de potências aparente e ativa, além do fator de potência para o caso simulado.

Figura 39 – Potência aparente, ativa e fator de potência, simuladas a partir de dados teóricos

Fonte: Software ATPDraw

$S_{cc} = 1227,6 \text{ VA}$, potência aparente de curto-circuito.

$P_{cc} = 241,01 \text{ W}$, potência ativa dissipada nas bobinas do transformador.

$FP = 0,19649$, fator de potência de curto-circuito.

No Quadro 9 estão os valores apresentados no livro e os simulados através do software. A potência aparente, de curto-circuito, foi calculada a partir dos valores de tensão e corrente informados no livro.

Quadro 9 – Resultados e comparação entre os valores extraídos do livro e os obtidos através de simulações, para o teste de curto-circuito

Grandezas	Dados do livro	Simulação	Erro relativo
Corrente de curto-circuito no primário	2,5 A	2,5109 A	0,436 %
Corrente de curto-circuito no secundário	83,33 A	83,697 A	0,440 %
Tensão nos terminais do primário	489 V	489,03 V	0,006 %
Tensão nos terminais do secundário	0 V	$\cong 0 \text{ V}$	-
Potência aparente de curto-circuito	1222,5 VA	1227,6 VA	0,417 %
Potência ativa de curto-circuito	240 W	241,01 W	0,421 %
Fator de potência de curto-circuito	0,196	0,19649	0,250 %

Fonte: Do autor

Analisando os dados do Quadro 9, na coluna do erro relativo, é possível inferir que a diferença entre os valores ensaiados e simulados, apesar de serem maiores que no ensaio a vazio, podem ser desprezados, demonstrando a eficiência da ferramenta.

4.2.3 Regulação de tensão e rendimento

A simulação de regulação de tensão foi realizada com os dados do livro de máquinas elétricas e transformadores, do autor Kosow (1982), páginas 532 e 533, exemplo 13.11, onde é apresentado a potência aparente, tensão primária, tensão secundário e reatância e resistência equivalentes referidas ao secundário do transformador.

$$S = 500 \text{ kVA};$$

$$V_p = 2300 \text{ V};$$

$$V_s = 230 \text{ V};$$

$$R_{eq} = 0,002 \Omega;$$

$$X_{eq} = 0,004 \Omega;$$

Com estas informações, são determinadas as correntes primária e secundária, e tensão induzida para os três tipos de cargas, resistiva com fator de potência igual a 1, indutiva com fator de potência igual a 0,8 e capacitiva com fator de potência igual a 0,6.

$$I_p = 217,39 \text{ A}$$

$$I_s = 2173,9 \text{ A}$$

Usando a equação 34 é possível encontrar o valor de tensão induzida E_2 , para as três cargas.

$$E_2 = (V_s \cos \phi + I_s R_{eqs}) + j(V_s \sin \phi \pm I_s X_{eqs})$$

Para carga com fator de potência 1:

$$E_2 = 234,71 \text{ V}$$

Carga com fator de potência 0,8 indutivo:

$$E_2 = 241,43 \text{ V}$$

Carga com fator de potência 0,6 capacitivo:

$$E_2 = 222,46 \text{ V}$$

Os valores calculados diferem um pouco dos apresentados no livro, devido aos arredondamentos ali realizados na apresentação do resultado final, porém, o método utilizado é o mesmo.

A regulação de tensão para estes valores, utilizando a equação 33 é:

$$R_{reg\%} = \frac{E_2 - V_s}{V_s} 100 \quad (33)$$

Para carga com fator de potência 1:

$$R_{reg\%} = 2,05\%$$

Carga com fator de potência 0,8 indutivo:

$$R_{reg\%} = 4,97\%$$

Carga com fator de potência 0,6 capacitivo:

$$R_{reg\%} = -3,28$$

A simulação foi realizada aplicando a tensão nominal no lado de alta, com transformador conectado aos três tipos de cargas apresentadas a seguir.

Impedância da carga com fator de potência 1:

$$R_{carga} = 10,57 \, \Omega$$

Impedância da carga com fator de potência 0,8 indutivo:

$$R_{carga} = 8,46 \, \Omega, X_{carga} = 6,34 \, \Omega$$

Impedância da carga com fator de potência 0,6 capacitivo:

$$R_{carga} = 6,34 \, \Omega, X_{carga} = 8,46 \, \Omega$$

A informação capacitiva a ser inserida no ATPDraw é em μMHO , portando a componente capacitiva da carga é:

$$\frac{1}{X_{carga}} = 115740,7 \, \mu MHO$$

Os resultados da simulação para a regulação de tensão são:

Para carga com fator de potência 1 a regulação foi de:

$$R_{reg\%} = 2,049\%$$

Para carga com fator de potência 0,8 indutivo a regulação foi de:

$$R_{reg\%} = 4,972\%$$

Para carga com fator de potência 0,6 capacitivo a regulação foi de:

$$R_{reg\%} = -3,29$$

No Quadro 10 estão as comparações entre os dados calculados, a partir do livro, e os de simulação, através do modelo implementado no software ATPdraw.

Quadro 10 – comparação entre os dados teóricos apresentados no livro e resultados da simulação no ATPDraw

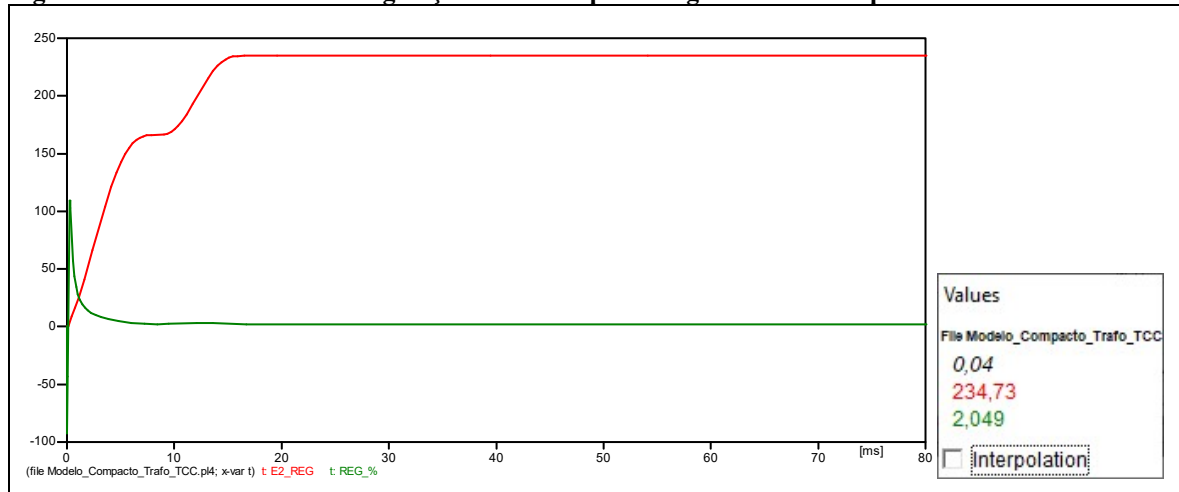
Carga/ fator de potência	Dados do livro		Simulação		Erro relativo	
	E_2 (V)	$R_{reg\%}$ (%)	E_2 (V)	$R_{reg\%}$ (%)	E_2	$R_{reg\%}$
Resistiva/1	234,71	2,05	234,73	2,049	0,009	0,049
Indutiva/0,8	241,43	4,97	241,45	4,972	0,008	0,040
Capacitiva/0,6	222,46	-3,28	222,45	-3,29	0,004	0,305

Fonte: Do autor

Os resultados obtidos com a simulação são bem próximos aos valores calculados, através das informações disponíveis no livro.

As Figuras 40, 41 e 42 apresentam os gráficos da tensão induzida e regulação de tensão para as cargas resistiva, indutiva e capacitiva.

Figura 40 – Tensão induzida e regulação de tensão para carga com fator de potência 1

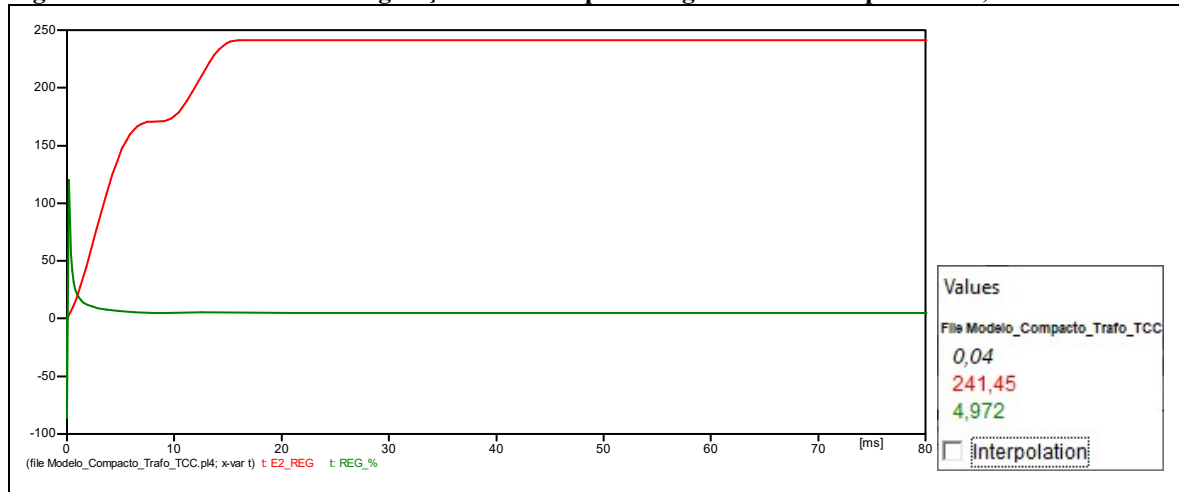


Fonte: Software ATPDraw

$E_{2reg} = 234,73 \text{ V}$, tensão induzida.

$REG_{\%} = 2,049 \%$, regulação de tensão.

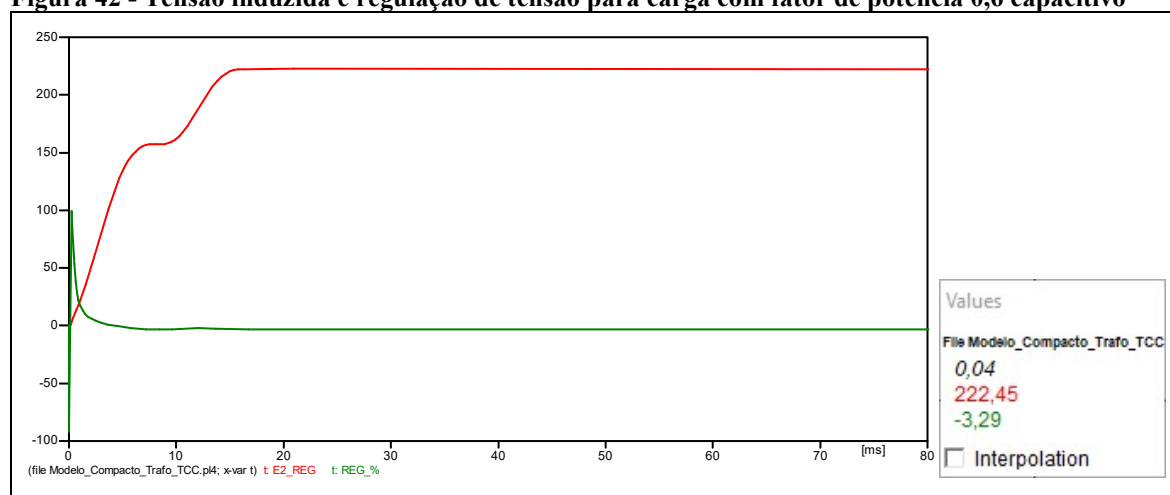
Figura 41 - Tensão induzida e regulação de tensão para carga com fator de potência 0,8 indutivo



Fonte: Software ATPDraw

$E_{2reg} = 241,45 \text{ V}$, tensão induzida.

$REG_{\%} = 4,972 \%$, regulação de tensão.

Figura 42 - Tensão induzida e regulação de tensão para carga com fator de potência 0,6 capacitivo

Fonte: Software ATPDraw

$E_{2reg} = 222,45 \text{ V}$, tensão induzida.

$REG_{\%} = -3,29 \%$, regulação de tensão.

A simulação de rendimento foi realizada com os dados do transformador apresentados no livro de máquinas elétricas e transformadores, do autor Kosow (1982), páginas 540 a 542 exemplo 13.14 e 13.15, onde estão descritos os parâmetros de um transformador e os dados de rendimento para diversas frações de carga. Conhecendo as impedâncias deste transformador, foi realizada a simulação nas mesmas condições de carga e comparado os resultados de rendimento.

Dados do transformador informados no livro e calculados a partir dos valores de ensaio a vazio e de curto-circuito:

500 kVA, 2300/208 V, 60 Hz

$a = 11,05$;

$R_{eq} = 0,173 \Omega$;

$X_{eq} = 0,4 \Omega$;

$R_c = 2934,8 \Omega$;

$X_m = 300,35 \Omega$.

O Quadro 11 apresenta os resultados teóricos de rendimento do transformador para seis situações de carregamento, o rendimento varia de 97,8% estando o equipamento sobrecarregado a 98,25% para uma situação de 25% da carga nominal.

Quadro 11 – Tabulação de rendimento para cargas com fator de potência unitário

Fração de carga	Perdas no núcleo	Perdas no cobre	Perdas totais	Saída total	Entrada total	Rendimento %
	watts	watts	watts	watts	Saída + perdas	(Saída total/entrada total)x100
1/4	1800	512	2312	125000	127312	98,25
1/2	1800	2050	3850	250000	253850	98,47
3/4	1800	4610	6410	375000	381410	98,25
1	1800	8200	10000	500000	510000	98,1
5/4	1800	12800	14600	625000	639600	97,8

Fonte: Kosow (1982, p. 541)

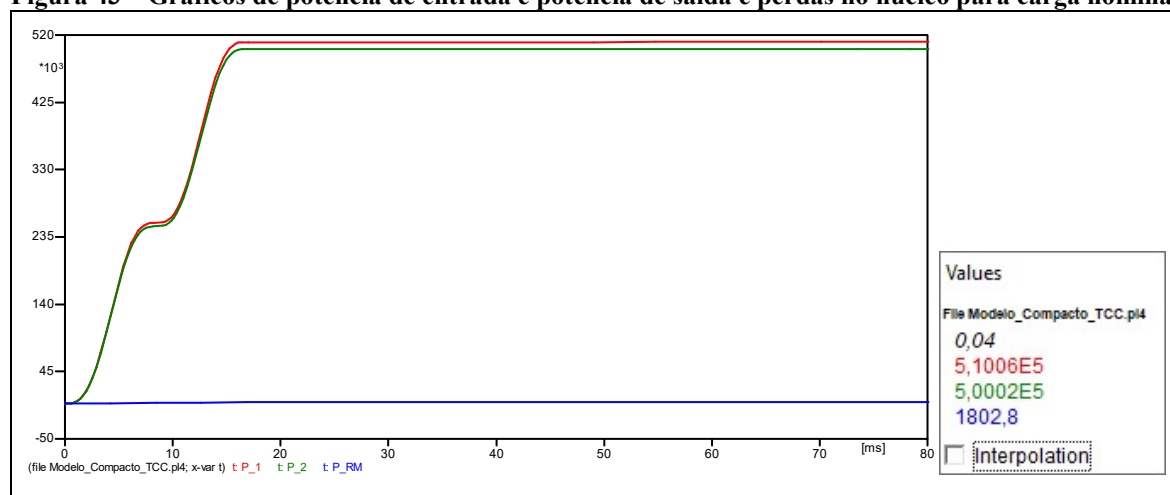
O Quadro 12 apresenta os resultados da simulação para o referido transformador apresentado em Kosow (1982), os valores de perdas no cobre e perdas totais foram obtidos através de cálculos.

Quadro 12 – Tabulação de rendimento para carga com fator de potência unitário, simulação ATPDraw

Fração de carga	Perdas no núcleo	Perdas no cobre	Perdas totais	Saída total	Entrada total	Rendimento %
	watts	watts	watts	watts	Saída + perdas	(Saída total/entrada total)x100
1/4	1802,8	527,2	2330	125010	127340	98,17
1/2	1802,8	2076,7	3879,5	250010	253889,5	98,47
3/4	1802,8	4647,2	6450	375000	381450	98,31
1	1802,8	8237,2	10040	500020	510060	98,03
5/4	1802,8	12847,2	14650	625060	639710	97,71

Fonte: Do autor

Na Figura 43 está representado o gráfico da simulação, para a situação de carga nominal, das potências de entrada e saída e perdas no núcleo, na Figura 44 está o gráfico de rendimento.

Figura 43 – Gráficos de potência de entrada e potência de saída e perdas no núcleo para carga nominal

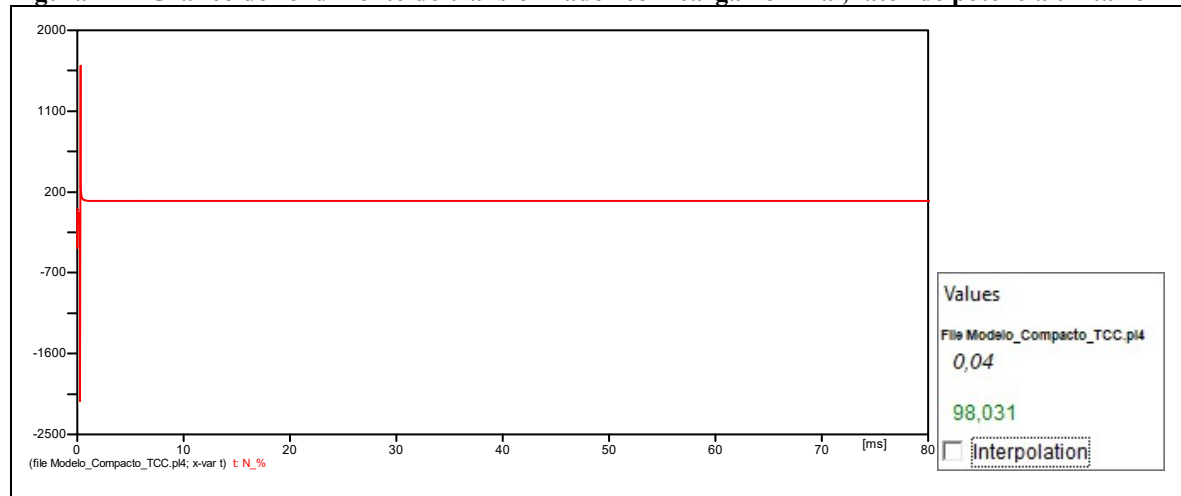
Fonte: Software ATPDraw

$P_1 = 510060 \text{ W}$, potência ativa de entrada.

$P_2 = 500020 \text{ W}$, potência ativa fornecida à carga.

$P_{RM} = 1802,8 \text{ W}$, potência ativa dissipada no ramo de magnetização.

Figura 44 – Gráfico de rendimento do transformador com carga nominal, fator de potência unitário



Fonte: Software ATPDraw

$n_{\%} = 98,031\%$, rendimento do transformador.

O Quadro 13 apresenta o erro relativo entre os dados teóricos e os de simulação computacional, os dados simulados resultaram em valores superiores aos apresentados no livro, esse erro representa o quanto o software ultrapassou os dados teóricos, e sua confiabilidade para estudos.

Quadro 13 – Erro relativo dos dados teóricos apresentado por Kosow e os dados da simulação no ATPDraw

Fração de carga	Perdas no núcleo	Perdas no cobre	Perdas totais	Saída total	Entrada total	Rendimento
	%	%	%	%	%	%
1/4	0,156	2,969	0,779	0,008	0,022	0,081
1/2	0,156	1,302	0,766	0,004	0,016	0,000
3/4	0,156	0,807	0,624	0,000	0,010	0,061
1	0,156	0,454	0,400	0,004	0,012	0,071
5/4	0,156	0,369	0,342	0,010	0,017	0,092

Fonte: Do autor

Mais uma vez o resultado foi satisfatório, pois o erro apresentado é muito pequeno.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo apresentar o tema simulação e modelagem computacional ao curso de engenharia elétrica, uma vez que ele é bastante debatido entre pesquisadores da área de educação em engenharias. O software ATPDraw foi escolhido como a ferramenta no uso de modelagem e simulação, devido a sua confiabilidade no meio científico. Ao trabalhar com simulação e modelagem dentro da engenharia elétrica do IFTO, o aluno pode aumentar o conhecimento dos conteúdos abordados em sala de aula, desenvolver habilidades específicas que não seria possível apenas de forma teórica. As aulas de laboratórios não abrangem todos os fenômenos estudados em sala de aula, o estudante precisa, de alguma maneira, ter um contato menos abstrato com os fenômenos elétricos, de modo a desenvolver as habilidades exigidas a engenheiro eletricista.

Com o recurso da modelagem computacional e um software confiável de base consolidada no meio científico, é possível trabalhar os temas da grade curricular sem a perda da qualidade de ensino, sem o risco em se trabalhar com altas tensões e correntes, e sem as limitações financeiras que acabam impossibilitando a aquisição de equipamentos para aulas práticas. A modelagem e simulação não substitui aulas teóricas ou práticas, mas as complementam, e satisfazem a necessidade da formação de um engenheiro pesquisador.

Neste trabalho, ainda foi proposto a modelagem de um transformador monofásico através do software ATPDraw. Foram apresentados os recursos oferecidos pelo software, e as várias formas de construir um modelo computacional de um elemento do sistema elétrico.

Para o modelo implementado, conhecendo-se as impedâncias do transformador é possível realizar o ensaio a vazio; de curto circuito; regulação de tensão; rendimento; potência de entrada e de saída; corrente senoidal ativa do ramo de magnetização; corrente senoidal reativa do ramo de magnetização; fator de potência do ramo magnetizante; potência ativa do ramo magnetizante; potência aparente do ramo magnetizante; tensão induzida no enrolamento secundário; tensão nos terminais primário e nos terminal secundário; corrente secundário; corrente primária; tensão a ser induzida no secundário; corrente RMS ativa no ramo de magnetização; corrente RMS reativa do ramo de magnetização; corrente de magnetização; fator de potência total; rendimento; potência aparente.

Diante dos resultados encontrados em todas as simulações, ficou demonstrado o quando a ferramenta é poderosa e as possibilidades de uso oferecidas por ela.

Como sugestões para a continuidade deste trabalho, fica a criação de um grupo de pesquisa voltada para o uso deste software e a melhoria do modelo apresentado, bem como a criação de outros.

REFERÊNCIAS

- ATPDraw. **MODELS no ATPDraw.** Disponível em: <https://www.atpdraw.net/help/models_in_atpdraw.htm>. Acesso em 10 de outubro de 2019.
- AUSUBEL, D. P. **Aquisição e retenção de conhecimentos: uma perspectiva cognitiva.** Lisboa: Plátano, v. 1, 2003. Disponível em: <<http://files.mestrado-em-ensino-de-ciencias.webnode.com/200000007-610f46208a/ausebel.pdf>>. Acesso em: 12 de junho de 2019.
- BACCA, I. A. ATPDraw: Introdução. **Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá/MT, 2007.**
- BARBOSA, E. F.; MOURA, D. G. Metodologias ativas de aprendizagem no ensino de engenharia. In: **Anais International Conference on Engineering and Technology Education.** Cairo, Egito. 2014. p. 110-116. Disponível em: <https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/33014822/Metodologias_Ativas_no_ensino_de_Engenharia_-_Eduardo_Barbosa.pdf>. Acesso em 07 de junho de 2019.
- BELHOT, R. V.; FIGUEIREDO, R. S.; MALAVÉ, C. O. O uso da simulação no ensino de engenharia. In: **Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, XXIX COBENGE.** 2001. p. 445-451. Disponível em: <http://www2.eesc.usp.br/aprende/images/arquivos/o_uso_da_simulacao_no_ensino.pdf>. Acesso em 06 de junho de 2019.
- BICA, D.; MOLDOVAN, C.; MUJI, M. Power engineering education using NEPLAN software. In: **2008 43rd International Universities Power Engineering Conference.** IEEE, 2008. p. 1-3. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4651684>>. Acesso em 12 de junho de 2019.
- BLANCO, E. S.; Costa. et al. Prática docente na educação em engenharia: uso de tecnologia educacional com base em metodologia. In: HOLZMANN, Henrique Ajuz; KUCKLA, Micheli. (Org.). **Possibilidades e Enfoques para o Ensino das Engenharias.** 1. ed. Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2019, v. 1, p. 119-129. Disponível em: <<https://www.atenaeditora.com.br/wp-content/uploads/2019/04/e-book-Possibilidades-e-Enfoques-para-o-Ensino-das-Engenharias.pdf>>. Acesso em 20 de outubro de 2019.
- CARDOSO, S. O. O.; DICKMAN, A. G. Simulação computacional aliada à teoria da aprendizagem significativa: uma ferramenta para ensino e aprendizagem do efeito fotoelétrico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 29, p. 891-934, 2012. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2012v29nesp2p891/23069>>. Acesso em 12 de junho de 2019.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas.** Tradução: Anatólio Laschuk. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- DE SOUZA, J. A.; DANDOLINI, G. A. Utilizando simulação computacional como estratégia de ensino: estudo de caso. **RENOTE**, v. 7, n. 1, 2009. Disponível em: <<https://www.seer.ufrgs.br/renote/article/view/13909/7817>>. Acesso em 26 maio de 2019.
- DEL TORO, V. **Fundamentos de Máquinas Elétricas.** Rio de Janeiro: LTC, 1999.

DUBÉ L. **USERS GUIDE TO MODELS IN ATP**. April 1996. Disponível em: <https://www.academia.edu/7994128/USERS_GUIDE_TO_MODELS_IN_ATP_ACKNOWLEDGMENTS?auto=download>. Acesso em 27 de outubro de 2019.

KOSOW, I. L. **Maquinas elétricas e transformadores**. Porto Alegre, Globo, 1982.

TELLES, F. Aprendizagem centrada no estudante como possibilidade para o aprimoramento do ensino de engenharia. In: HOLZMANN, Henrique Ajuz; KUCKLA, Micheli. (Org.). **Possibilidades e Enfoques para o Ensino das Engenharias**. 1. ed. Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2019, v. 1, p. 11-21. Disponível em: <<https://www.atenaeditora.com.br/wp-content/uploads/2019/04/e-book-Possibilidades-e-Enfoques-para-o-E ensino-das-Engenharias.pdf>>. Acesso em 20 de outubro de 2019.

MENDONÇA, M. V. B. et al. Modelagem de Equipamentos Eletroeletrônicos Utilizando Fontes Lineares e Chaveadas sob Condições Não Ideais de Alimentação na Plataforma ATP. **VII CBQEE**, Santos/SP, 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Jose_Oliveira27/publication/260318488_Modelagem_de_Equipamentos_Eletroeletronicos_Utilizando_Fontes_Lineares_e_Chaveadas_sob_Condicoes_Nao_Ideais_de_Alimentacao_na_Plataforma_ATP/links/02e7e539082fe7cb63000000.pdf>. Acesso em 07/06/2019

MIGUEL, P. M. **Introdução à Simulação de Relés de Proteção Usando a Linguagem “MODELS” do ATP**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna. 2011.

MILANO, F.; VANFRETTI, L. State of the art and future of OSS for power systems. In: **2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting**. IEEE, 2009. p. 1-7. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5275920>>. Acesso em 12 de junho de 2019.

MILANO, F.; VANFRETTI, L.; MORATAYA, J. C.. An open source power system virtual laboratory: The PSAT case and experience. **IEEE Transactions on Education**, v. 51, n. 1, p. 17-23, 2008. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4358720>>. Acesso em 01 de junho de 2019.

MOREIRA, V. R. et al. Aprimorando o ensino de engenharia com novas abordagens usando recursos computacionais. In: **Anais do VI Congresso Tecnológico InfoBrasil TI & Telecom**. 2013.

OLIVEIRA, J. C. COGO, J. R. ABREU, J. P. G. **Transformadores: teoria e ensaios**. 2. ed. São Paulo: Bulcher, 2018. 192 p.

PEREIRA, C. S.; DOS SANTOS JUNIOR, G. Metodologias de ensino para a formação de engenheiros no ensino superior: uma revisão sistemática. **Laplage em Revista**, v. 4, n. 3, p. 180-189, 2018. Disponível em: <<http://www.laplageemrevista.ufscar.br/index.php/lpg/article/view/527/784>>. Acesso em 26 de maio de 2019.

PRIKLER, L.; HOIDALEN, H. K. **ATPDRAW version 5.6 for Windows 9x/NT/2000/XP/Vista: user's manual**. Norway, November 2009. Disponível em: <https://www.academia.edu/23054418/ATPDRAW_version_5.6_Manual>. Acesso em: 14 de maio de 2019.

REIS, A. et al. Curso de ATPDraw. **Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica e Dinâmica de Sistemas Elétricos, Universidade Federal de Uberlândia**, Uberlândia, 2012.

SILVA, V. M.; OLIVEIRA, W. S. Softwares gratuitos e de código aberto: ensino e aprendizagem das engenharias. In: HOLZMANN, Henrique Ajuz; KUCKLA, Micheli. (Org.). **Possibilidades e Enfoques para o Ensino das Engenharias**. 1. ed. Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2019, v. 1, p. 219-237. Disponível em: <<https://www.atenaeditora.com.br/wp-content/uploads/2019/04/e-book-Possibilidades-e-Enfoques-para-o-Ensino-das-Engenharias.pdf>>. Acesso em 20 de outubro de 2019.

TAMASHIRO, M. A. et al. Comparative Study of TACS/DBM and MODELS of ATP-EMTP Applied to Power Systems Computer Simulation. **IEEE Latin America Transactions**, vol. 14, no. 2, Feb. 2016. Disponível em: <http://www.revistaieeela.pea.usp.br/issues/vol14issue2Feb.2016/14TLA2_40Tamashiro.pdf>. Acesso em 12 de maio de 2019.

TAVARES, K. A. **Modelagem e Simulação da Proteção Diferencial de Transformadores de Potência no ATP**. 2013. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

TAVARES, M. C. D.; CAMPOS, P. G.; PRADO, P. **Guia Resumido do ATP–Alternative Transient Program**. UNICAMP, Campinas, Nov, 2003. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~cristina/pos%20graduacao/GUIA.ATP.pdf>>. Acesso em 20 de outubro de 2019.

UMANS, S. D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. Tradução: Anatólio Laschuk. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

APÊNDICE A – MANUAL PARA O MINICURSO DE ATP

Minicurso: Introdução ao uso do ATP, Simulação com ATPDraw.

Instrutor: Gleison Siqueira de Souza

Orientadores: Prof. Dr. Marcio Augusto Tamashiro

Prof. Me. Kaisson Teodoro de Souza

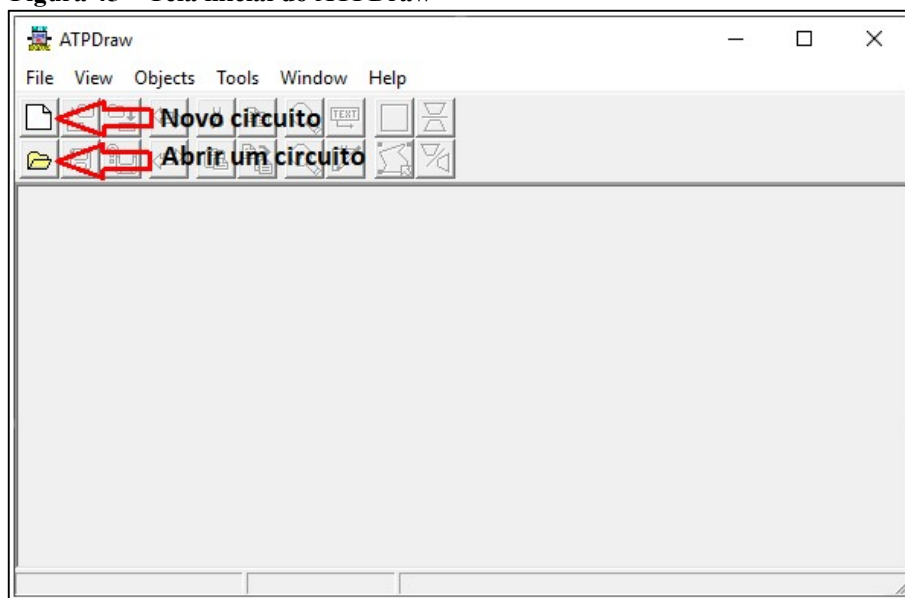
Resumo: Neste minicurso serão trabalhados os conceitos básicos de utilização do software ATPDraw, será apresentado as principais ferramentas e formas de acessa-las. Será proposto a simulação de alguns circuitos para fixar o conhecimento apresentado.

AMBIENTE DE TRABALHO

Este tutorial dá apenas uma introdução de como usar o simulador ATPDraw, não aborda modelagem de objetos, que é um excelente recurso oferecido pelo software. Desta forma o usuário irá trabalhar apenas com o aplicativo ATPDraw montando e simulando circuitos com os modelos disponíveis.

Clicando no atalho do aplicativo ATPDraw, disponível na barra de ferramentas ou área de trabalho de seu computador, irá abrir o programa, como o representado pela Figura 45.

Figura 45 – Tela inicial do ATPDraw



Fonte: software ATPDraw.

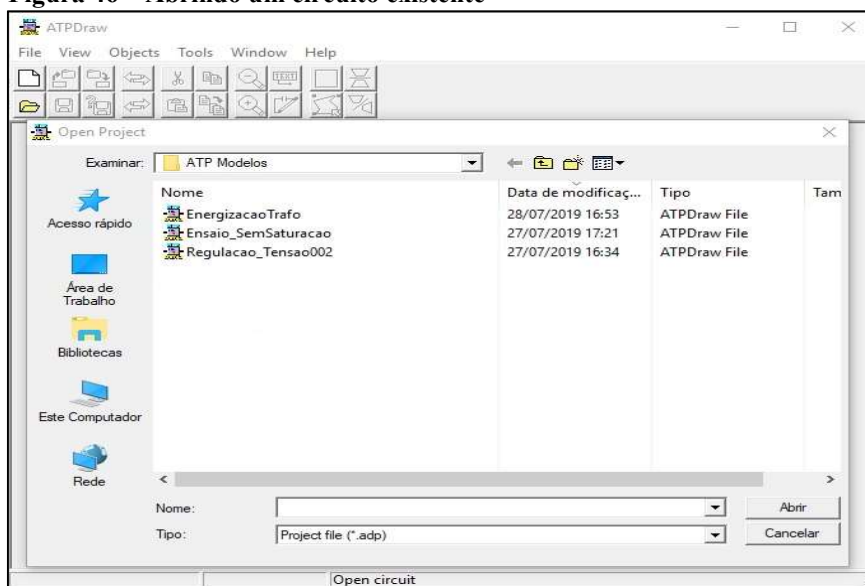
A Figura 45 mostra a tela inicial do programa, toda vez que o usuário abrir o aplicativo através do atalho ATPDraw, esta tela será apresentada.

Nesta tela encontra-se apenas duas funções ativas na barra de ferramentas:

1. New circuit – Abre uma nova janela para criar um circuito;
2. Open circuit – Abre um circuito já criado anteriormente e salvo no computador.

Para iniciar a simulação, primeiramente terá que montar o circuito pretendido ou abri um já existente. Clicando no ícone “Open circuit”, Figura 45, representado pela pasta amarela, uma janela de busca se abrirá, como na Figura 46, onde o usuário pode está abrindo um circuito criado anteriormente e salvo em pasta específica.

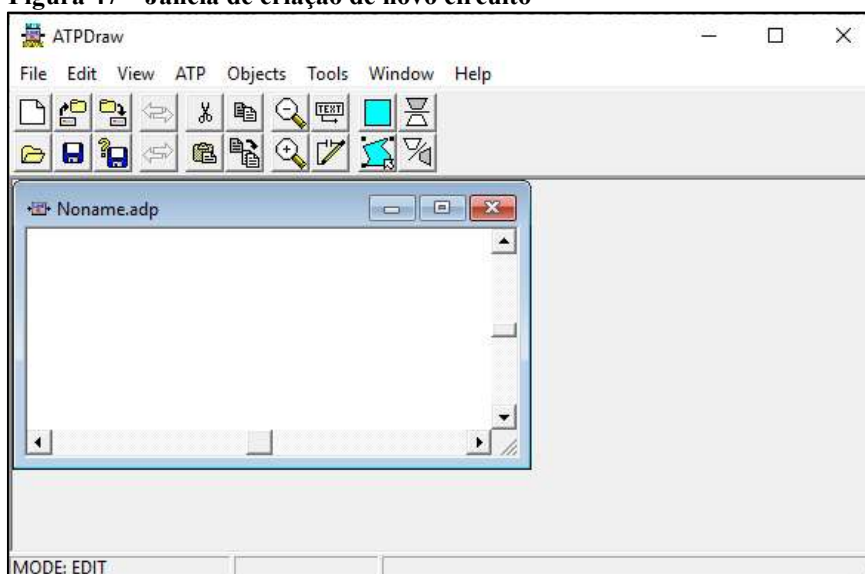
Figura 46 – Abrindo um circuito existente



Fonte: software ATPDraw.

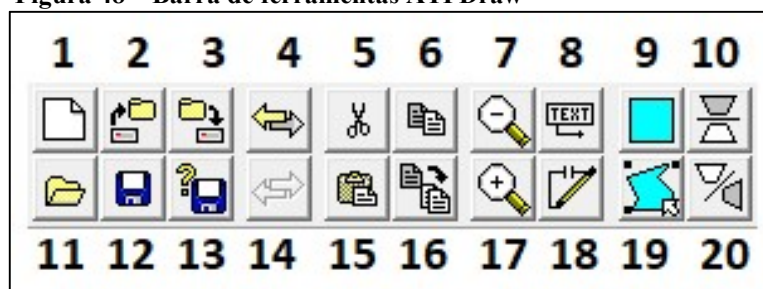
Selecionando o circuito desejado e clicando em abrir, este estará abrindo na janela de circuito onde poderá ser editado e simulado.

Para criar um novo circuito, o usuário deve clicar no ícone “New circuit”, representado por uma folha em branco, uma nova janela em branco se abrirá, como a Figura 47.

Figura 47 – Janela de criação de novo circuito

Fonte: software ATPDraw.

É nesta janela onde será montado o circuito a ser simulado, ela pode ser maximizada, para trabalhar com uma área maior, e pode ser minimizada, caso esteja trabalhando com mais de um circuito. Diferente da primeira janela, Figura 1, esta apresenta mais funções ativas em sua barra de ferramentas, como destacado na Figura 48, e barra de menus, que posteriormente estaremos detalhando apenas o menu ATP, onde ocorre as configurações mínimas para rodar uma simulação. A numeração sequencial apresentada na Figura 4 é apenas para determinar uma ordem de apresentação.

Figura 48 – Barra de ferramentas ATPDraw

Fonte: Adaptado de software ATPDraw

A barra de ferramentas acima apresenta um conjunto de opções para o usuário está editando o circuito, clicando diretamente sobre a ferramenta desejada ou através das teclas de atalho. As funções de cada ferramenta são:

1. New circuit – Abre uma nova janela para a criação de um circuito;
2. Import project – Insere um circuito do arquivo na janela do circuito ativo;
3. Export circuit– Salva os objetos selecionados do circuito ativo em um arquivo de disco;

4. Undo – Desfaz o último comando realizado, tecla de atalho, “*Alt+Backspace*”;
5. Cut – Recorta o objeto selecionado, tecla de atalho, “*Ctrl+X*”;
6. Copy – Copia o objeto selecionado, tecla de atalho, “*Ctrl+C*”;
7. Zoom Out – Reduz o tamanho dos objetos na janela em 20%, tecla de atalho, “-”;
8. Editlabel–Insere um texto ou move os textos de rótulo dos componentes ou nós;
9. Selectall – Seleciona todos os objetos da janela, tecla de atalho, “*Ctrl+A*”;
10. Flip – Gira o objeto selecionado em 180°;
11. Open circuit – Abre um circuito já criado e salvo no computador, tecla de atalho, “*Ctrl+O*”;
12. Salve circuit – Salva as modificações realizadas no arquivo já salvo no disco, se o arquivo não estiver salvo o comando realizado será o salve as, tecla de atalho, “*Ctrl+S*”;
13. Salve as –Salva os objetos da janela em uma pasta específica com um novo nome;
14. Redo – Refaz o último comando cancelado com a ferramenta “Undo”, tecla de atalho “*Shift+Alt+Backspace*”;
15. Paste – Cola o conteúdo da área de transferência, tecla de atalho, “*Ctrl+V*”;
16. Duplicate – Duplica o objeto selecionado, tecla de atalho, “*Ctrl+D*”;
17. Zoom In – Aumenta o tamanho dos objetos na janela em 20%, tecla de atalho, “+ no teclado numérico ou tecla = no alfanumérico”;
18. Refresh – Restaura as distorções dos objetos, tecla de atalho, “*R*”;
19. Select group – Seleciona os objetos da tela de forma livre, delimitando a região, mão livre, após selecionado a região, clica com botão direito do mouse para finalizar, tecla de atalho, “*Ctrl+P*” ou “*duplo clique com o botão esquerdo o mouse*”;
20. Rotate – Gira o objeto selecionado 90° no sentido anti-horário clicando com o botão direito do mouse ou tecla de atalho, “*Ctrl+R*”.

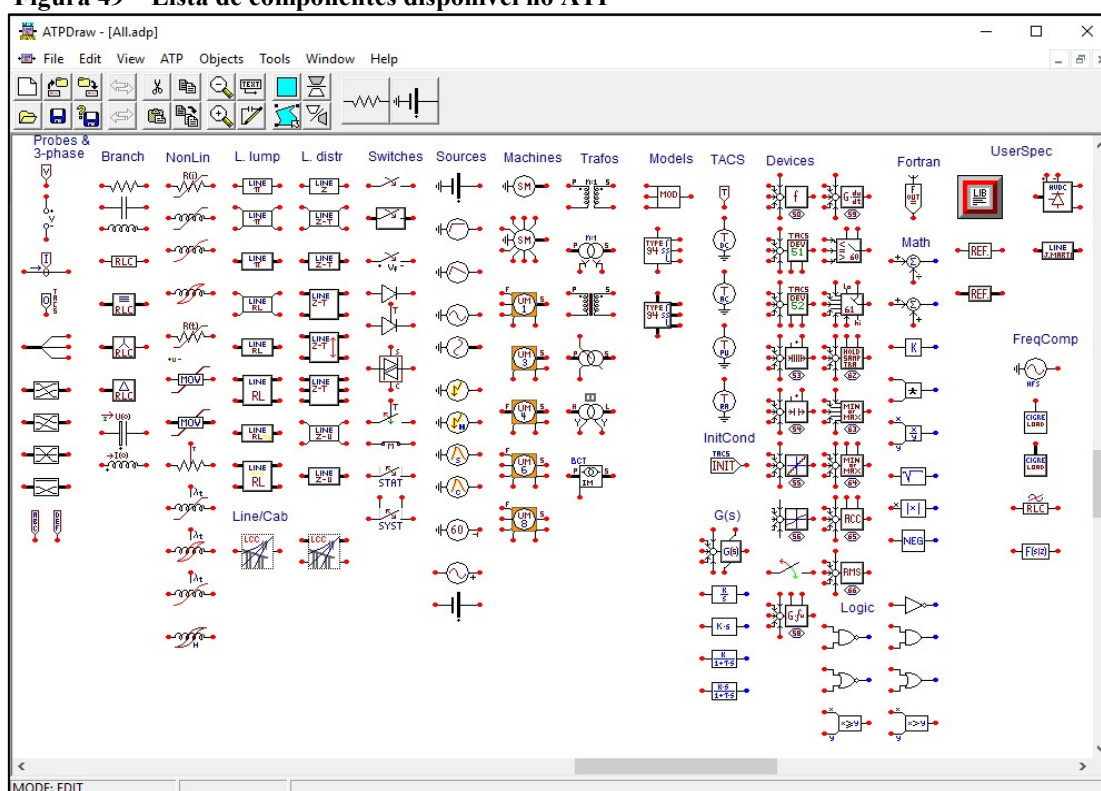
Estas são ferramentas suficientes para uma abordagem inicial de uso do software, a seguir vamos aprender a encontrar e configurar os componentes de um circuito.

O ATPDraw possui diversos modelos de componentes prontos, e ainda possibilita a criação de novos modelos de acordo com a necessidade do usuário.

A lista de componentes pode ser encontrada na pasta de exemplos de circuitos que o ATPDraw possui, esta lista pode ser encontrada através do diretório, C:\ATP\project\example, nesta pasta de exemplos podem ser encontrados diversos circuitos prontos para serem simulados. A Figura 49 traz uma lista de componentes já disponível.

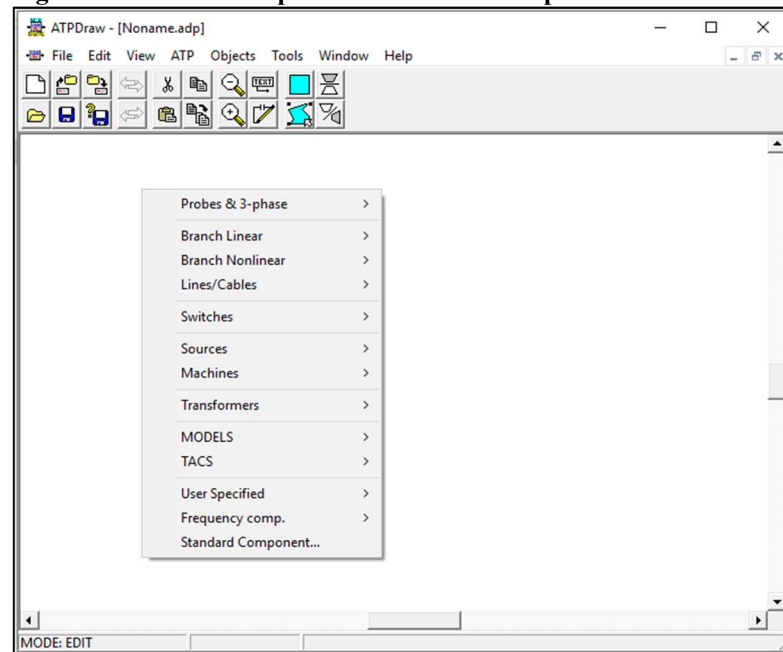
Inserir um componente destes na janela de trabalho do circuito se dá de forma fácil, após abrir o programa e clicar em “New circuit”, basta clicar com o botão direito do mouse em uma área livre da janela do circuito que uma aba com vários menus e submenus se abrirá, que são os mesmos representados pela Figura 49.

Figura 49 – Lista de componentes disponível no ATP



Fonte: software ATPDraw.

A Figura 50 mostra esse processo de inserção de um componente para a montagem de um circuito.

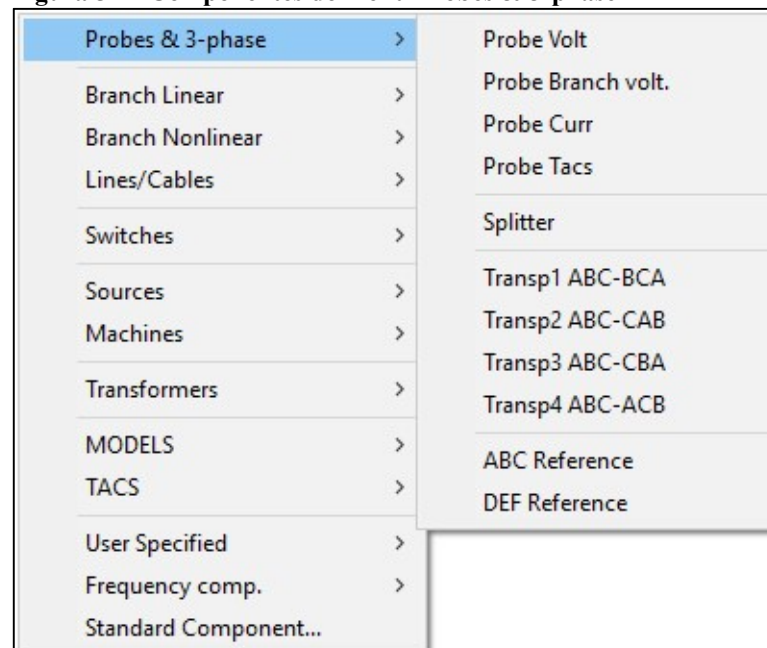
Figura 50 – Aba de componentes modelados disponível no ATPDraw

Fonte: software ATPDraw.

Percorrendo o mouse por cada menu, uma nova aba com submenus se abrirá, onde é possível escolher o componente desejado de acordo com sua funcionalidade e circuito a ser simulado, veja a Figura 51.

Probes & 3-phase

Sondas para monitoramento de tensão e corrente, elementos de divisão de circuito trifásico e monofásico, elemento para definir sequência de fase.

Figura 51 – Componentes do menu Probes & 3-phase

Fonte: software ATPDraw.

Os componentes deste menu, que iremos especificar, são:

Probe Volt – Usado para medir tensão entre um nó e o terra, “voltímetro”;

Probe Branch Volt – Usado para medir tensão entre dois pontos do circuito, “voltímetro”;

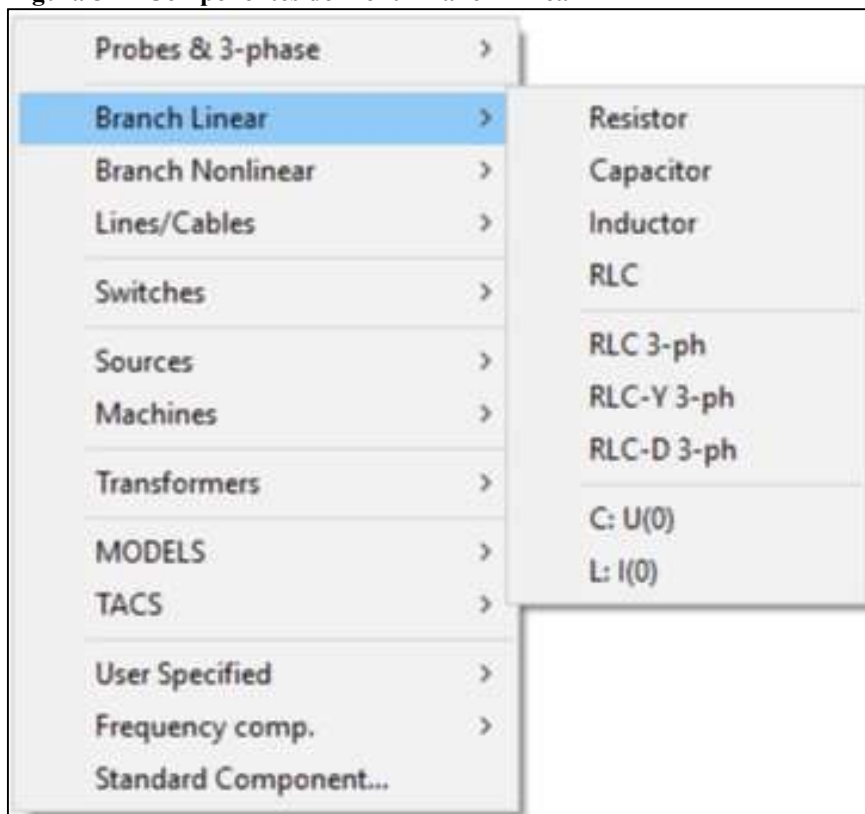
Probe Cur – Usado para medir corrente em uma linha do circuito, “amperímetro”;

Probe Tacs – Especifica a saída do sinal e insere o objeto TACS Type33 no arquivo ATP.

Branch Linear

Semelhantemente ao caso anterior, percorrendo o mouse até “Branch Liner”, abre a lista de componentes deste menu, como mostra a Figura 52.

Figura 52 – Componentes do menu Branch Linear



Fonte: software ATPDraw.

Este menu apresenta os componentes lineares.

Resistor – Elemento puramente resistivo, dado em $[\Omega]$;

Capacitor – Capacitor linear com opção de resistência de amortecimento em série, capacitância C em μF se $C_{opt} = 0$ ou μMohs se $C_{opt} = \text{power frequency}$;

Indutor – Indutor linear com opção de resistência de amortecimento em paralela, indutância L em mH se $X_{opt} = 0$ ou Ohms se $X_{opt} = \text{power frequency}$;

Copt e Xopt são configurados no menu ATP>Settings>Simulation ou tecla de atalho F3.

RLC – Resistência, indutância e capacitância em série;

RLC 3-ph – Resistência, indutância e capacitância em série nas 3 fases, valores de cada elemento configurado individualmente;

RLC-Y 3-ph – Resistência, indutância e capacitância nas 3 fases, acoplamento em estrela, valores de cada elemento configurado individualmente;

RLC- Δ 3-ph – Resistor, indutor e capacitor nas 3 fases, acoplamento em delta, valores de cada elemento configurado individualmente;

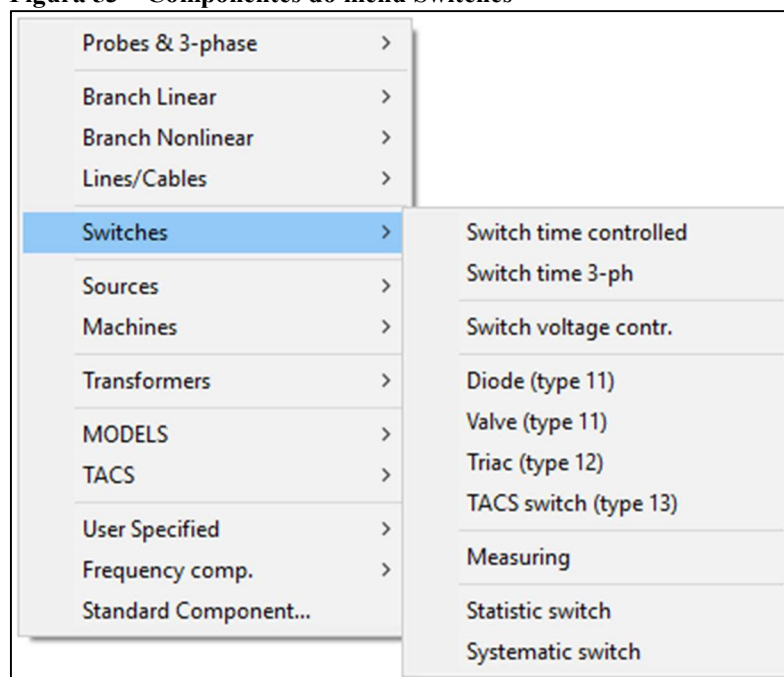
C:U(0) – Capacitor com condição inicial de tensão;

L:I(0) – Indutor com condição inicial de corrente.

Switches (Chaves)

O ATPDraw suporta a maioria dos elementos do tipo de chave do ATP, como chaves comuns controladas por tempo ou tensão, opções para modelagem de diodos, válvulas e triacs, além de chaves de medição e estatísticas, como representado pela Figura 53.

Figura 53 – Componentes do menu Switches



Fonte: software ATPDraw.

O submenu Switches contém os seguintes objetos:

Switch time controlled – Chave monofásica controlada por tempo;

Switch time 3-ph – Chave trifásica controlada por tempo, controle independente por fases;

Switch voltage contr. – chave controlada por tensão;

Diode – Diodo;

Valve – Valvula/tiristor;

Triac; Chave com duplo controle;

TACS switch – Chave simples;

Measuring – Chave de medição

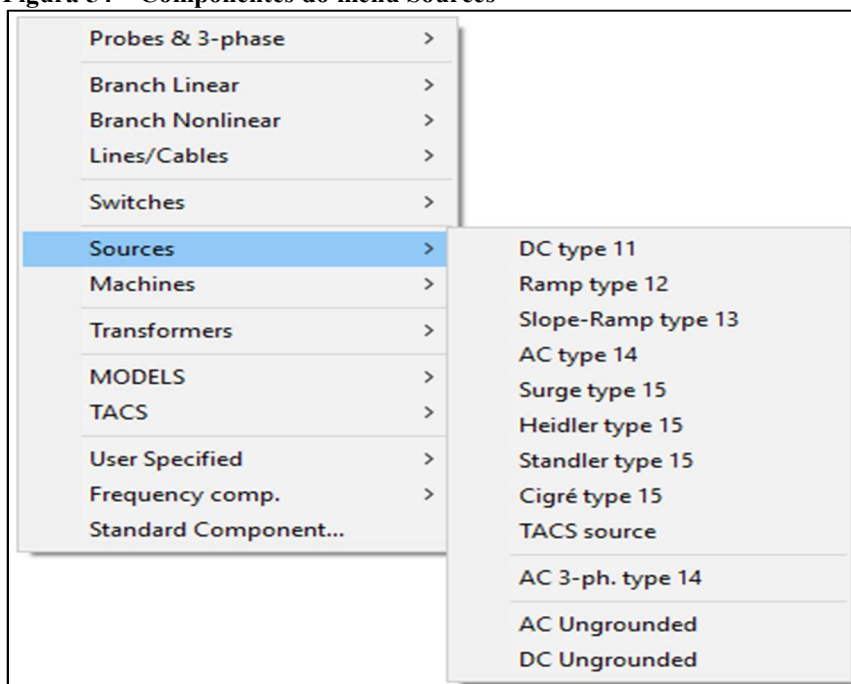
Sttatic switch – Chave estática;

Systematic switch – Chave sistemática.

Sources (Fontes)

A Figura 54 apresenta o menu “Sources”, onde, nos submenus estão as fontes do ATPDraw

Figura 54 – Componentes do menu Sources



Fonte: software ATPDraw.

DC type11 –Fonte contínua, tensão ou corrente;

Ramp type 12 – Fonte tipo rampa, tensão ou corrente;

Slop-Ramp type – Fonte tipo rampa dupla, tensão ou corrente;

AC type 14 – Fonte alternada, tensão ou corrente;

Surge type 15 – Fonte exponencial dupla;

Heidlertype 15 – Fonte de sobretensão;

Standlertype 15 – Fonte de sobretensão;

Cigrétype 15 – Fonte de sobretensão;

TACS source – Fonte controlada;

AC 3-ph. type 14 – Fonte alternada trifásica, corrente ou tensão;

AC Ungrounded – Fonte de tensão alternada, não aterrada;

DC Ungrounded – Fonte de tensão contínua, não aterrada.

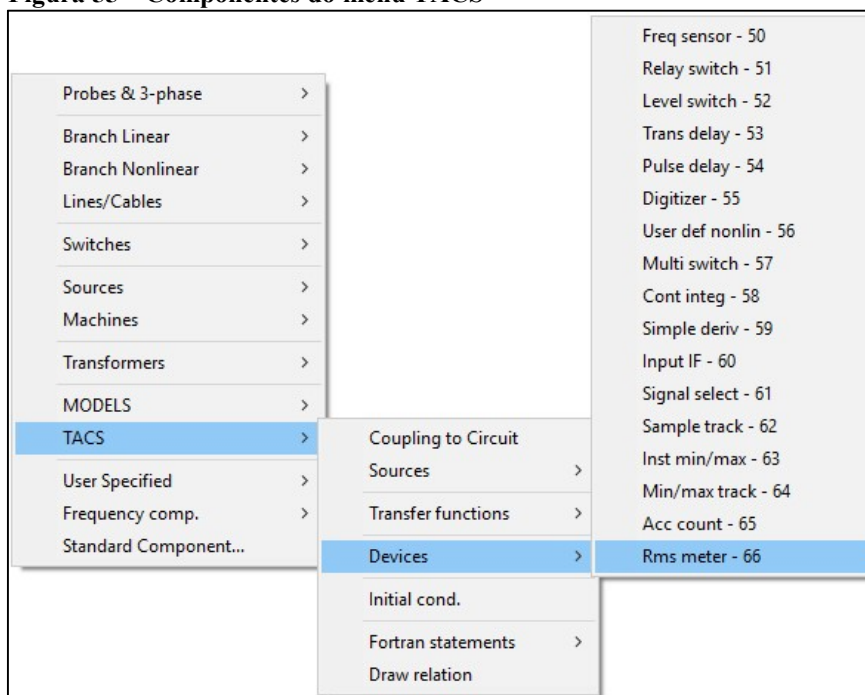
TACS

O TACS é um módulo de simulação para análise no domínio do tempo de sistemas de controle. Para o TACS, é usada uma representação em diagrama de blocos dos sistemas de controle.

O menu TACS fornece acesso à maioria dos tipos de componentes TACS do ATP.

O submenu TACS no menu de seleção de componentes apresentados na Figura 55, destaque para os seguintes itens:

Figura 55 – Componentes do menu TACS



Fonte: software ATPDraw.

Couplingto Circuit – Valor do circuito elétrico para o TACS;

90 – Tensão do nó;

91 – Corrente de comutação;

92 – Variável interna especial EMTP comp;

93 – Status da chave.

Devices – Rms meter-66 – Valor RMS da soma dos sinais de entrada.

Configurando os componentes

Para configurar os componentes do circuito basta dar um duplo clique sobre ele que uma nova janela se abrirá, onde será possível fazer os ajustes desejados, por exemplo:

Figura 56 – Janela de configuração da fonte AC type 14

DATA	VALUE
Amp.	311.13
f	60
Pha	-90
A1	0
TSta	-1
TSto	1

NODE	PHASE	NAME
AC	1	

Order: 0 Label: U

Comment:

Type of source:
☐ Current
☒ Voltage

☐ Hide ☐ Lock

OK Cancel Help

Fonte: software ATPDraw.

Amp. – Valor de pico, tensão de fase, da fonte;

f – Frequência de operação em Hz;

Pha – Fase, em graus ou segundos, a fonte é cossenoidal, (-90 para transformar em senoidal);

A1 – Se = 0, fase em graus, se = 1, fase em segundos;

TSta – Início de operação da fonte, se = -1, regime permanente, se = 0, transitório;

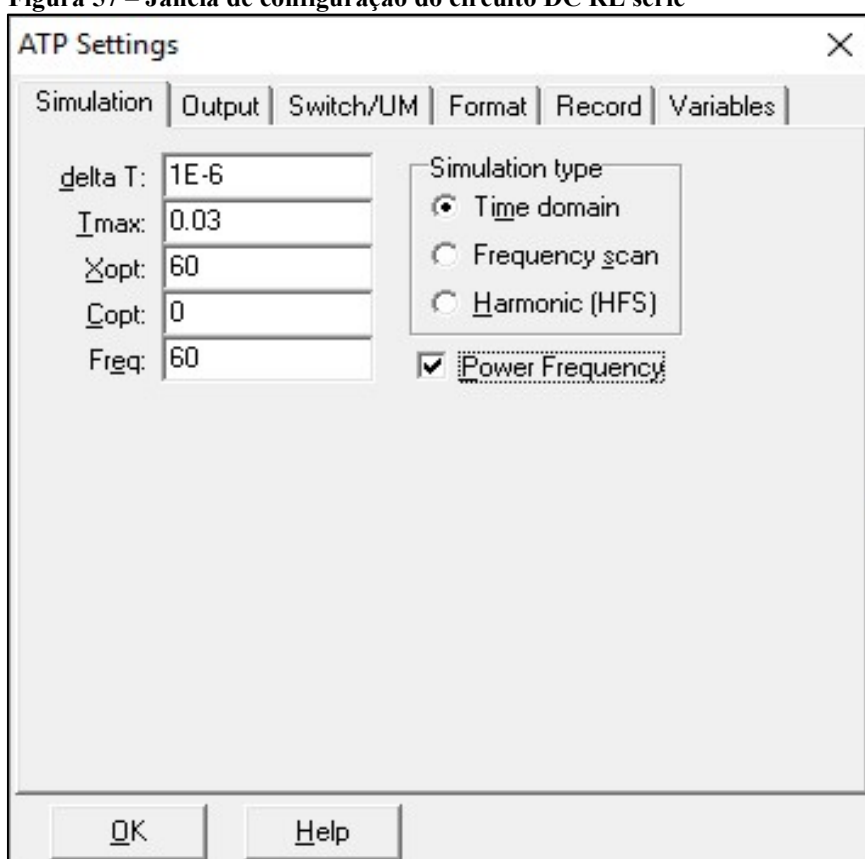
TSto – Tempo final de operação da fonte, recomendado valor 1 ou maior.

Para todos os componentes a janela de configuração é semelhante à Figura 56, no botão “Help” é possível obter as informações de cada campo da janela.

Configurando a simulação

Para configurar a simulação, basta ir até a barra de menus, em “ATP/Settings”, ou tecla de atalho F3, que abrirá a janela representada pela Figura 57, na aba “Simulation”.

Figura 57 – Janela de configuração do circuito DC RL série



Fonte: software ATPDraw.

delta T – Passo de integração, depende do fenômeno simulado;

Tmax – Tempo de simulação;

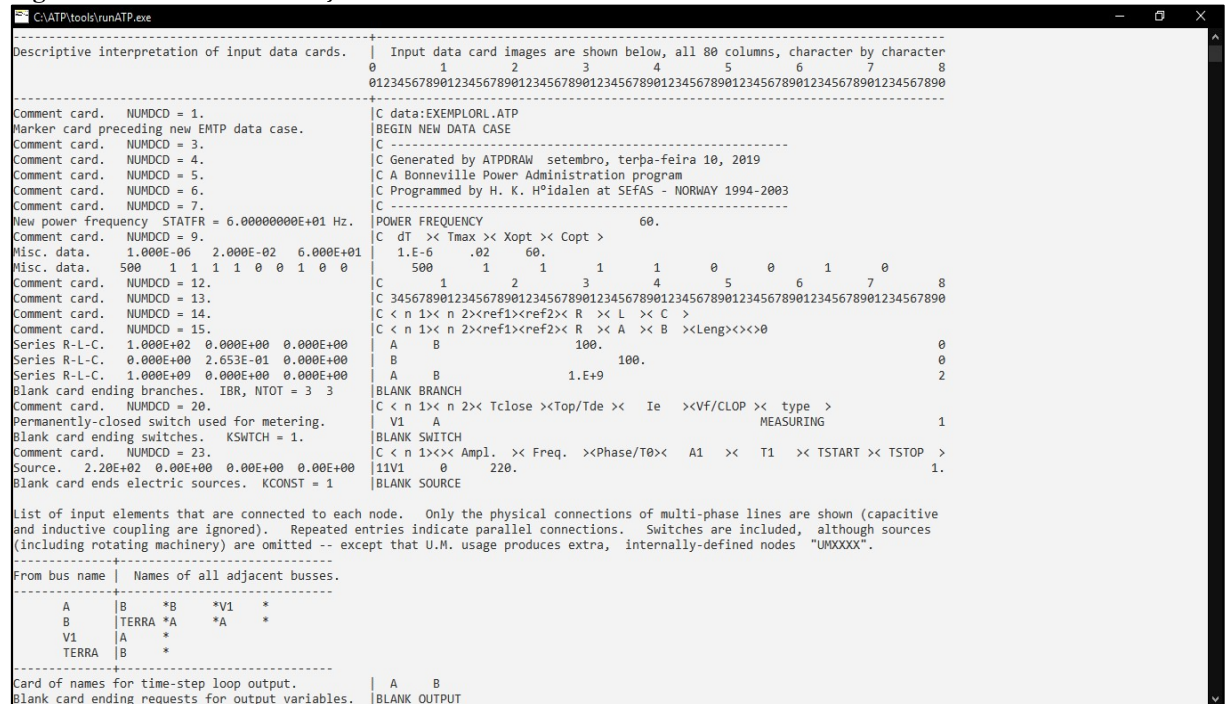
Xopt – Depende da unidade da indutância, indutância em mH, Xopt = 0, indutância em ohms, Xopt = Freq, frequência de operação do sistema;

Copt – Depende da unidade da capacitância, capacitância em μF , Copt = 0, capacitância em μMohs , Copt = Freq, frequência de operação do sistema.

Rodando a simulação

Para rodar a simulação, basta ir até a barra de menus, em “ATP/run ATP”, ou tecla de atalho F2, o programa fará a checagem dos parâmetros do circuito, na janela representada pela Figura 58, estão as informações da simulação.

Figura 58 – Janela de execução do circuito DC RL série

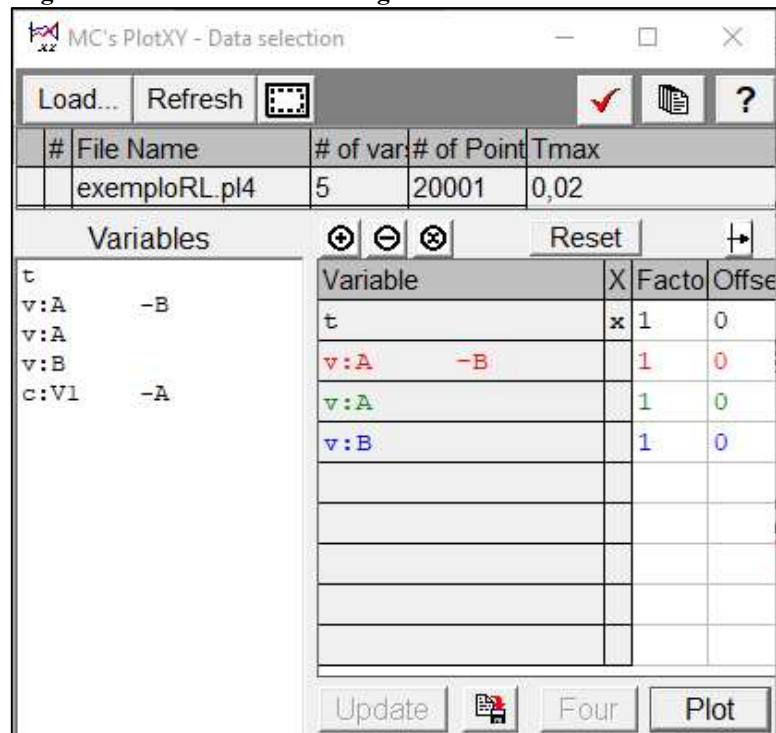


Fonte: software ATPDraw.

Gerando os gráficos

Para gerar os gráficos, após configurar e executar a simulação, basta ir até a barra de menus, em “ATP/PlotXY”, veja a Figura 59.

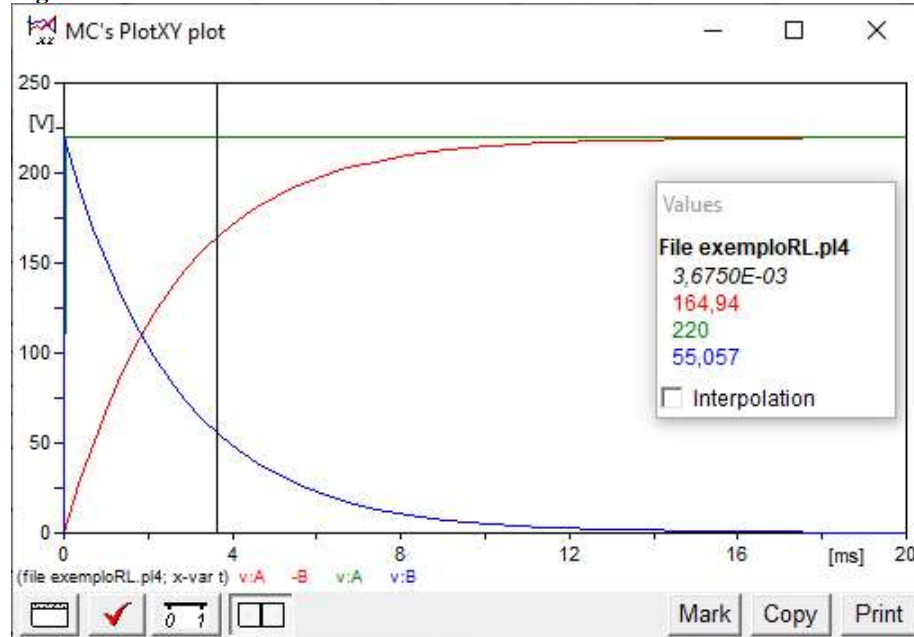
Figura 59 – Janela de variáveis gráficas do circuito DC RL série



Fonte: software ATPDraw.

No campo “Variables”, estão as variáveis do circuito, elas são pontos específicos onde foram colocadas as sondas de medições, “probes”. Clicando com o mouse em algumas destas variáveis, elas são inseridas no campo de plotagem. Clicando no botão “Plot”, Figura 59, é gerado o gráfico das variáveis selecionadas, Figura 60.

Figura 60 – Gráficos do circuito DC RL série

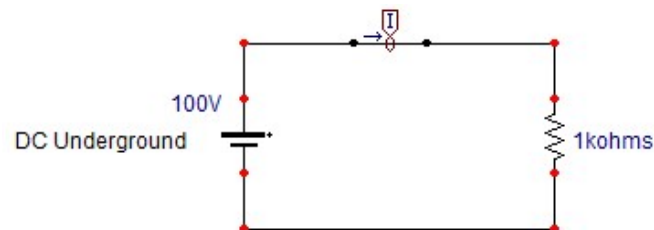


Fonte: software ATPDraw.

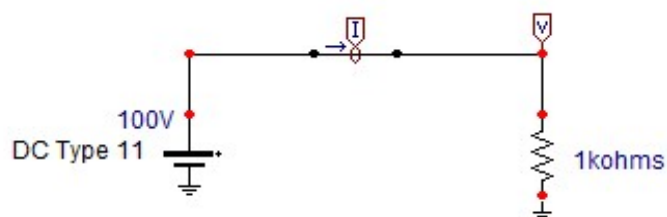
Nesta Figura está representada queda de tensão no resistor, v:A-B, a tensão na fonte v:A e a tensão no indutor v:B.

MODELOS PARA SIMULAÇÕES

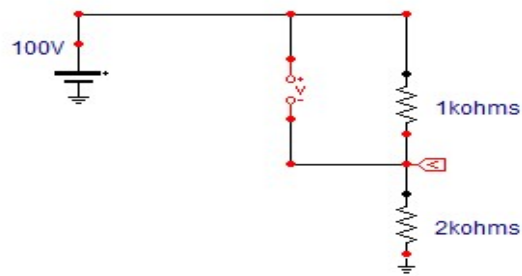
1) Circuito DC resistivo – Medição de corrente



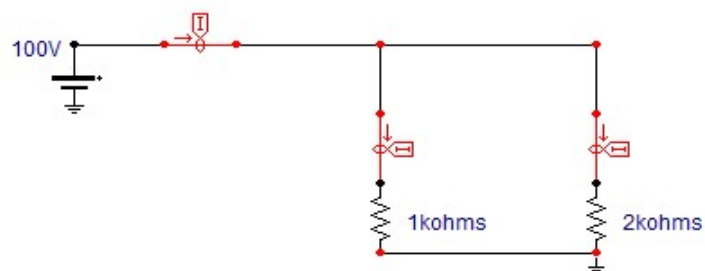
2) Circuito DC resistivo – Medição de corrente, tensão e potência



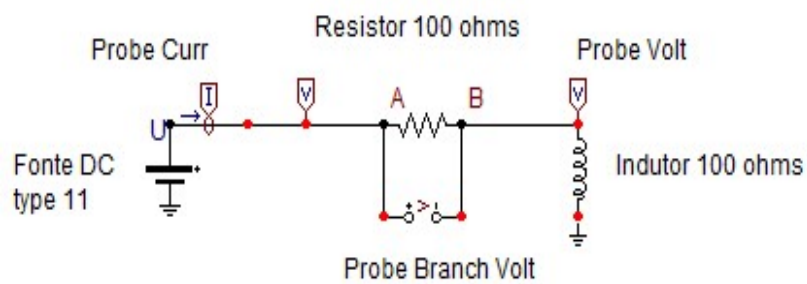
3) Circuito DC resistivo série – Divisor de tensão



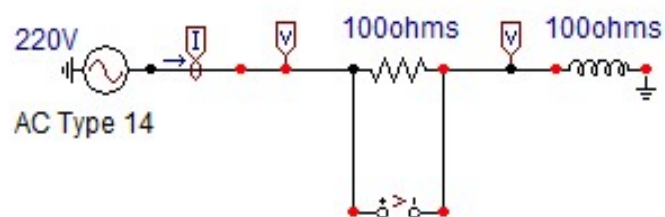
4) Circuito DC resistivo paralelo – Divisor de corrente



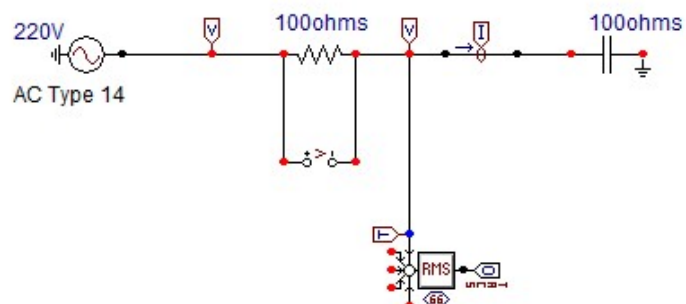
5) Circuito DC – RL série



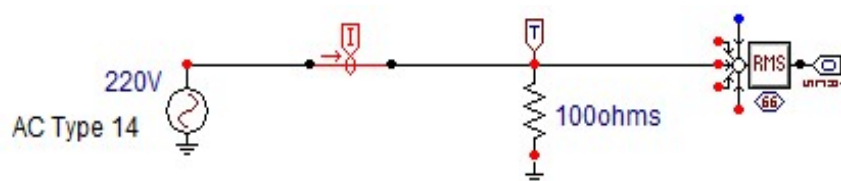
6) Circuito AC – RL série



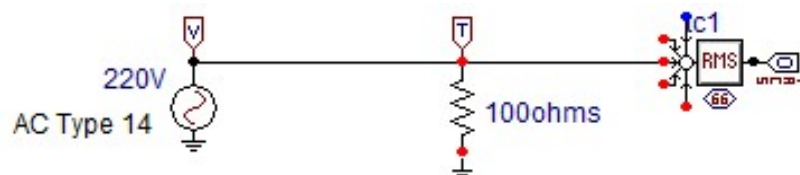
7) Circuito AC – RC série



8) Circuito AC –Medição de corrente eficaz



9) Circuito AC – Medição de tensão eficaz



10) Circuito AC – Retificador de meia onda

