

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



CHRISTIANY BELINI GOULART DELFIN

**MODELAGEM DE REATORES NATURALMENTE
SATURADOS USANDO CIRCUITO EQUIVALENTE
MAGNÉTICO UNIFICADO EM ROTINA DA
MODELS NO ATP**

Recife, Dezembro de 2013.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**MODELAGEM DE REATORES NATURALMENTE
SATURADOS USANDO CIRCUITO EQUIVALENTE
MAGNÉTICO UNIFICADO EM ROTINA DA
MODELS NO ATP**

por

CHRISTIANY BELINI GOULART DELFIN

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: MANOEL AFONSO DE CARVALHO JÚNIOR, Ph.D.

Recife, Dezembro de 2013.

© Christiany Belini Goulart Delfin, 2013

Folha de aprovação

Dedico este trabalho a pessoa que Deus colocou em vida que me apoio nessa caminhada em busca de um sonho. Nylson Marcos Delfin, nossas almas por Deus já estavam unidas e apenas faltava os nossos olhos se encontrarem, e partir daí tudo teve um brilho diferente e tudo ficou mais fácil, as lutas terão motivos e a vitória é nosso amor!

AGRADECIMENTOS

À Deus, obrigado Senhor, pelo dom precioso da vida, obrigado pelo meus pais, marido, irmãs, amigos , professores, por todos quantos fizeram parte dessa nossa história e nos ajudaram a crescer e a sermos mais gente, obrigado por esta etapa vencida, por nosso passado e por nosso futuro. Receba Senhor, nossa alegria e nossa eterna gratidão, que tua constante presença ilumine sempre nosso futuro.

Ao meu orientador, Prof. Manoel Afonso de Carvalho Júnior, pela amizade, confiança, apoio e dedicação e principalmente pela oportunidade de realizar este trabalho.

À minha família, pais, minhas queridas irmãs e cunhados pela confiança, apoio, incentivo, principalmente pelas orações da minha mãe, Maria José Belini Goulart, obtendo a realização desse sonho.

À amiga Ândria Gabriel de Souza por acreditar no meu potencial, sempre do meu lado, ajudando, orientando, acreditando e incentivando, uma pessoa maravilhosa que Deus colocou no caminho.

Às amigas Isadora, Regina, Letícia e ao amigo Ramon pela orientação, apoio, compreensão, estímulo acadêmico, pelas convivências agradáveis, companhias animadas e pelas sinceras amizades.

À Professora Milde e a Valdete pela amizade, compreensão e Carinho.

Ao Professor Ronaldo Aquino, pelos seus conselhos, na qual teve a contribuição muito importante e decisiva na minha vida acadêmica.

*"Nunca deixe que lhe digam
Que não vale a pena
Acreditar no sonho que se tem
Ou que você nunca vai ser alguém
Tem gente que machuca ou outros
Tem gente que não sabe amar
Mas eu sei que um dia a gente aprende*

*Se você quiser alguém em que confiar
Confie em si mesmo
Quem acredita sempre alcança."*

(Mais uma vez – Renato Russo)

Resumo da Dissertação apresentada à UFPE como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

MODELAGEM DE REATORES NATURALMENTE SATURADOS USANDO CIRCUITO EQUIVALENTE MAGNÉTICO UNIFICADO EM ROTINA DA MODELS NO ATP

Christiany Belini Goulart Delfin

Dezembro/2013

Orientador: Manoel Afonso de Carvalho Júnior, Ph.D.

Área de Concentração: Processamento de Energia.

Palavras-chave: Reator Naturalmente Saturado, Rotina MODELS, ATP, Circuito Equivalente Magnético Unificado, Transformadores saturados.

Número de Páginas: xix+106

RESUMO: As simulações de fenômenos transitórios frequentemente requerem a representação de elementos não lineares, como reatores e transformadores saturados usados em compensadores reativos para o controle e a qualidade da tensão no sistema elétrico. O software ATP (*Alternative Transient Program*) é umas das ferramentas computacionais mais utilizadas em estudos transitórios eletromagnéticos. No entanto, a representação dos modelos de reatores a núcleo naturalmente saturado representam grandes desafios, principalmente no que tange às características magnéticas dos equipamentos. Com o objetivo de explorar e entender o circuito magnético o presente trabalho aborda não só o desenvolvimento como também a implementação de algoritmos de reatores naturalmente saturados no ambiente da MODELS do ATP utilizando o modelo de circuito equivalente magnético unificado (UMEC). Este modelo calcula o fluxo magnético no ramo em cada etapa de tempo, resultando assim numa matriz admitância adicionada nos terminais de um circuito equivalente de Norton.

Abstract of Dissertation presented to UFPE as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

**MODELING NATURALLY SATURATED
REACTORS USING MAGNETIC CIRCUIT
EQUIVALENT IN UNIFIED MODELS IN ROUTINE
ATP**

CHRISTIANY BELINI GOULART DELFIN

December /2013

Supervisor(s): Manoel Afonso de Carvalho Júnior, Ph.D.

Concentration Area: Energy Processing.

Keywords: Naturally Saturated Reactor, Routine MODELS, ATP, Unified Magnetic Equivalent Circuit, Transformers saturated.

Number of Pages: xix+106.

ABSTRACT: The simulations of transient phenomena often require the representation of non-linear elements, such as saturated reactors and transformers used in compensating for the reactive control and the quality of the voltage in the electrical system. The software ATP (Alternative Transient Program) is one of the most frequently used computational tools for electromagnetic transient studies. However, the representation of the reactor core models naturally saturated pose great challenges, especially in that concern the magnetic characteristics of the equipment. In order to explore and understand the magnetic circuit this paper addresses not only the development but also the implementation of algorithms reactors naturally saturated environment MODELS in ATP using the magnetic equivalent circuit model (UMEC). This model calculates the magnetic flux in the branch in each time step, thus resulting in added admittance matrix terminals of a Norton equivalent circuit.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS.....	XVI
LISTA DE ABREVIATURAS	XVII
LISTA DE SÍMBOLOS	XVIII
CAPITULO 1.....	1
INTRODUÇÃO	1
1.1- CONSIDERAÇÕES INICIAS	1
1.2 OBJETIVOS PRETENDIDOS	3
1.3 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....	4
CAPITULO 2.....	5
PROGRAMAS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS	5
2.1 – SOFTWARE ATP.....	6
2.2 – LINGUAGEM MODELS NO ATP.....	7
2.3 - INTERAÇÃO COM A REDE ELÉTRICA	11
2.3.1 FILES (SUP/MOD).....	11
2.3.2 TYPE 94:	14
CAPITULO 3.....	17
MODELO MATEMÁTICO DE REATORES NATURALMENTE SATURADO EM PROGRAMAS TRANSITÓRIO ELETROMAGNÉTICO	17
3.1 – INDUTOR NÃO LINEAR NO EMTP.....	17
3.1.1 – MÉTODO DE APROXIMAÇÃO LINEAR POR TRECHOS.....	18
3.2 – REATOR SATURADO NO EMTP.....	26
3.2.1 TRANSFORMADORES COM DOIS ENROLAMENTOS NO ATP	27
3.2.2 TRANSFORMADORES COM TRÊS ENROLAMENTOS NO ATP	30
CAPÍTULO 4.....	34
MODELANDO REATORES NATURALMENTE SATURADO USANDO CIRCUITO EUIVALENTE MAGNETICO UNIFICADO.....	34
4.1 REPRESENTAÇÃO DO FLUXO NO RAMO DO REATOR:.....	34
4.2 UMEC - EQUIVALENTE DE NORTON	36
4.3 CÁLCULOS DOS PARÂMETROS MAGNÉTICOS:	38
4.3.1 CURVA $B \times H$:	38
4.3.2 PERMEÂNCIA NO RAMO:	41
4.3.3 PERMEÂNCIA DE DISPERSÃO:	42
4.3.4 PERMEÂNCIA DE SEQUENCIA ZERO OU RETORNO:.....	42

4.3.5 FLUXO NO RAMO:	42
4.3.6 FLUXO DE DISPERSÃO:.....	42
4.3.7 FLUXO DE SEQUENCIA ZERO OU RETORNO:	42
4.3.8 FLUXO NO YOKE:	42
4.4 REATOR NATURALMENTE SATURADO MODELO UMEC MONOFÁSICO	44
4.4.1 REATOR NATURALMENTE SATURADO COM 1 NÚCLEO, 1 ENROLAMENTO E 1 RETORNO	44
4.4.2 TRANSFORMADOR SATURADO COM 2 NÚCLEOS E 2 ENROLAMENTOS.....	45
4.5 REATOR NATURALMENTE SATURADO MODELO UMEC TRIFÁSICO	49
4.5.1 REATOR NATURALMENTE SATURADO TRIFÁSICO COM 3 NÚCLEOS, 6 ENROLAMENTOS E 2 RETORNOS	49
4.5.2 REATOR NATURALMENTE SATURADO TRIFÁSICO DE 3 NÚCLEOS, 9 ENROLAMENTOS E 2 RETORNOS	51
CAPÍTULO 5.....	55
SIMULAÇÕES DO MODELO UMEC DE REATORES NATURALMENTE SATURADO NA MODELS DO ATP.....	55
5.1 – MODELO UMEC MONOFÁSICO NA MODELS	55
5.1.1 – REATOR NATURALMENTE SATURADO COM 1 NÚCLEO, 1 ENROLAMENTO E 1 RETORNO – RNS1	55
5.1.2 – REATOR NATURALMENTE SATURADO MONOFÁSICO COM 2 NÚCLEOS E 2 ENROLAMENTOS – RNS2.....	59
5.2 – MODELO UMEC TRIFÁSICO NA MODELS	66
5.2.1 – REATOR SATURADO TRIFÁSICO COM 3 NÚCLEOS, 6 ENROLAMENTOS E 2 RETORNOS – RNS6YD.....	66
5.2.2 - REATOR SATURADO TRIFÁSICO COM 3 NÚCLEOS, 6 ENROLAMENTOS E 2 RETORNOS COM PERDAS HISTERESE - RNS6YDH	71
5.2.3 – REATOR SATURADO TRIFÁSICO COM 3 NÚCLEOS, 9 ENROLAMENTOS E 2 RETORNOS – RNS9ZIGD.....	73
A FORMA DE ONDA DAS CORRENTES DA MODELS E DO ATP PARA COMPARAÇÃO CONSIDERANDO A MESMA ARQUITETURA DOS ENROLAMENTOS ESTÃO REPRESENTADA NA FIGURA 5.51.....	78
5.2.4 REATOR NATURALMENTE SATURADO TRIFÁSICO COM 3 NÚCLEOS, 9 ENROLAMENTOS E 2 RETORNOS COM PERDAS HISTERESE – RNS9ZIGDH	78
5.2.5 – REATOR SATURADO TRIFÁSICO COM 3 NÚCLEOS, 9 ENROLAMENTOS E 2 RETORNOS – RNS9ZAGD	79
5.2.6 - REATOR NATURALMENTE SATURADO TRIFÁSICO COM 3 NÚCLEOS, 9 ENROLAMENTOS E 2 RETORNOS COM PERDAS HISTERESE – RNS9ZAGDH	83

5.2.7 – REATOR NATURALMENTE SATURADO TRIFÁSICO COM 9 NÚCLEOS, 24 ENROLAMENTOS E 6 RETORNOS – RNS699	85
5.2.8 – REATOR NATURALMENTE SATURADO TRIFÁSICO COM 9 NÚCLEOS, 24 ENROLAMENTOS E 6 RETORNOS COM PERDAS HISTERESE – RNS699H.....	92
CAPITULO 6.....	94
CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
6.1 – CONCLUSÃO.....	94
6.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	96
6.3 – PUBLICAÇÕES	96
APÊNDICE.....	97
7.1 – CÁLCULO DA MATRIZ INVERSA NA LINGUAGEM MODELS	97
ANEXOS	102
8.1 - APLICAÇÃO DO MÉTODO DE INTEGRAÇÃO TRAPEZOIDAL EM SISTEMA ELÉTRICOS	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Modelo magnético dos Transformadores saturados.	2
Figura 1.2 – Modelo Elétrico de Transformadores.....	2
Figura 2.1 – Circuito aplicado à regra de integração trapezoidal para indutor.....	6
Figura 2.2 – Software ATP e seus principais componentes.	7
Figura 2.3 – Principais Instruções da MODELS	9
Figura 2.4 – Instruções do Grupo MODEL.....	9
Figura 2.5 – MODELS integrada com a rede elétrica.	11
Figura 2.6 – Localização do arquivo Files (sup/mod) da MODELS no ATPDraw.	12
Figura 2.7 – Caixa de dialogo com dados da Models.....	12
Figura 2.8 – Elemento da MODELS formado pelo Files (sup/mod).....	12
Figura 2.9 – Exemplo de um circuito da MODELS no ATPDraw usando files.	13
Figura 2.10 – Corrente na Saída da MODELS (○) e Corrente na Saída da rede elétrica (□).....	13
Figura 2.11 – Localização do arquivo Type 94 da MODELS no ATPDraw.....	15
Figura 2.12 – Caixa de dialogo contendo os dados da componente Type 94 da MODELS	15
Figura 2.13 – Elemento Type 94 da MODELS no ATPDraw.....	15
Figura 2.14 - Exemplo de um circuito da MODELS no ATPDraw usando Type 94.....	16
Figura 2.15 – Saída na MODELS (○) e Saída na rede elétrica (□).	16
Figura 3.1 – Característica $V \times I$ do reator naturalmente saturado	17
Figura 3.2 – Diagrama unifilar de um compensador estático.	17
Figura 3.3 – Circuito simulador da curva $\lambda \times i$ de um indutor não linear.	18
Figura 3.4 - Circuito simulador da curva $\lambda \times i$ com 2 trechos.	18
Figura 3.5 – Indutor não linear do software ATPDraw.	19
Figura 3.6 – Localização do indutor não linear type 98 no ATPDraw.....	19
Figura 3.7 – Possível erro de mudança de trecho.....	20
Figura 3.8 – Curva $\lambda \times i$ em dois trechos.....	20
Figura 3.9 – Curva $\lambda \times i$ de um indutor não linear.....	21
Figura 3.10 - Algoritmo Curva $\lambda \times i$ pelo método de aproximação linear por trechos	22
Figura 3.11 – Circuito da MODELS 9 trechos no ATPDraw.	23
Figura 3.12 – Caixa de dados da MODELS Indutor para 9 trechos.....	23
Figura 3.13 – Corrente na saída da MODELS 9 trechos.....	23
Figura 3.14 – Curva $\lambda \times i$ na MODELS.....	24
Figura 3.15 – Circuito no ATPDraw no Type 98.....	24

Figura 3.16 – Dados do componente Type 98.....	24
Figura 3.17 – Corrente no ATPDraw pelo Type 98.....	25
Figura 3.18 – Corrente no Type 98 (□) e na MODELS (○) com 9 trechos	25
Figura 3.19 – Localização do transformador saturável no ATPDraw.....	26
Figura 3.20 – Transformador monofásico tipo Core (a) e tipo Shell (b).....	27
Figura 3.21 – Transformador trifásico tipo Core (a) e tipo Shell (b).....	27
Figura 3.22 – Transformador com dois enrolamentos modelo Steinmetz	27
Figura 3.23 – Modelo de transformador com três enrolamentos.....	30
Figura 3.24 – Caixa de dados do componente do transformador saturável trifásico do ATP.....	30
Figura 3.25 – Circuito elétrico do Transformador com três enrolamentos.	31
Figura 3.26 – Forma de Onda do ATP devido a instabilidade numérica.	32
Figura 3.27 – Comprimento médio magnéticos com tamanho iguais dos enrolamentos do reator.	32
Figura 3.28 – Comprimento médio magnéticos com tamanho diferentes dos enrolamentos do reator.	33
Figura 4.1 – Circuito magnético no Ramo do reator	35
Figura 4.2 – Representação da Permeância incremental.	36
Figura 4.3 – Representação do núcleo do reator.	38
Figura 4.4 – Curva $B \times H$ pelo método de aproximação linear por trechos.	39
Figura 4.5 - Algoritmo Curva $B \times H$ pelo método de aproximação linear por trechos	39
Figura 4.6 – Laço de histerese representação das perdas por histerese.	40
Figura 4.7 – Laço Histerese na MODELS.	40
Figura 4.8 - Algoritmo Curva $B \times H$ pelo método de aproximação linear por trechos com perdas histerese.....	41
Figura 4.9 - Algoritmo modelo UMEC reator naturalmente Saturado.....	43
Figura 4.10 – Reator com 1 núcleo, 1 enrolamento e 1 retorno.	44
Figura 4.11 – Circuito magnético e circuito modelo UMEC do reator	44
Figura 4.12 – Circuito magnético e circuito modelo UMEC do transformador.	45
Figura 4.13 – Circuito magnético e circuito simplificado em aberto	47
Figura 4.14 – Circuito magnético e circuito simplificado em curto circuito	48
Figura 4.15 – Circuito magnético do reator trifásico de 6 enrolamentos.....	49
Figura 4.16 – Modelo UIMEC do reator trifásico de 6 enrolamentos.....	49
Figura 4.17 – Matriz A reator trifásico de 6 enrolamentos	50
Figura 4.18 – Matriz P reator trifásico de 6 enrolamentos	50
Figura 4.19 – Matriz M_{ss} do reator trifásico de 6 enrolamentos.....	50
Figura 4.20 – Matriz Y_{ss} do reator trifásico de 6 enrolamentos.....	51
Figura 4.21 – Circuito magnético do reator trifásico de 9 enrolamentos.....	51

Figura 4.22 – Modelo UIMEC do reator trifásico de 9 enrolamentos.....	52
Figura 4.23 – Matriz A reator trifásico de 9 enrolamentos	52
Figura 4.24 – Matriz P reator trifásico de 9 enrolamentos	53
Figura 4.25 – Matriz M_{ss} do reator trifásico de 9 enrolamentos.....	53
Figura 4.26 – Matriz Y_{ss} do reator trifásico de 9 enrolamentos.....	53
Figura 5.1 – Circuito do RNS1 na MODELS no ATP	55
Figura 5.2 – Dados de entrada da MODELS no ATP.....	56
Figura 5.3 – Curva $B \times H$ na MODELS	56
Figura 5.4 – Corrente no reator saturado monofásico modelo UMEC na MODELS.....	56
Figura 5.5 – Circuito Indutor não linear no ATP.	57
Figura 5.6 – Corrente no reator saturado na MODELS (\square) e corrente no reator saturado no Type 98 do ATP (\circ).....	57
Figura 5.7 – Circuito indutor não linear no ATP com perdas R, L.....	58
Figura 5.8 – Corrente no reator saturado na MODELS (\square) e corrente no reator saturado no Type 98 do ATP (\circ).....	58
Figura 5.9 – Dimensões do RNS2.....	59
Figura 5.10 – Circuito do RNS2 na MODELS no ATP	60
Figura 5.11 – Dados de entrada da MODELS no ATP	60
Figura 5.12 – Curva $B \times H$ na MODELS	60
Figura 5.13 – Fluxo magnético do transformador	61
Figura 5.14 – Tensão no primário (\circ) e tensão no secundário (\square) do transformador	61
Figura 5.15 – Transformador monofásico em sistema teste.....	61
Figura 5.16 – Corrente no primário (a) e Corrente no secundário (b) teste em vazio.	62
Figura 5.17 – Corrente no primário (a) e Corrente no secundário (b) teste em curto.	62
Figura 5.18 – Corrente no primário (a) e Corrente no secundário (b) teste em plena carga.	62
Figura 5.19 –Circuito magnético e elétrico do ATP (a) (b) e UMEC (c) (d)	63
Figura 5.20 – Circuito do transformador saturável no ATP.....	63
Figura 5.21 –Caixa de dados do transformador saturável no ATP.	64
Figura 5.22 – Correntes no primário MODELS (\square) e ATP (\circ)(a) e Corrente no secundário MODELS (\square) e ATP (\circ)(b) teste em vazio	64
Figura 5.23 – Correntes no primário MODELS (\square) e ATP (\circ)(a) e Correntes no secundário MODELS (\square) e ATP (\circ)(b) teste em curto circuito.....	65
Figura 5.24 – Correntes no primário MODELS (\square) e ATP (\circ)(a) e Correntes no secundário MODELS (\square) e ATP (\circ)(b) teste em plena carga.....	65
Figura 5.25 – Ligação estrela – Delta do Reator.....	66
Figura 5.26 – Circuito do RNS6 na MODELS no ATP	67

Figura 5.27 – Dados de entrada da MODELS no ATP.....	67
Figura 5.28 – Curva $B \times H$ na MODELS.	67
Figura 5.29 – Tensão no primário fase A (○), fase B (□) e fase C (Δ) do RNS6Yd na MODELS...	68
Figura 5.30 – Corrente no primário fase A (○) do RNS6Yd na MODELS.....	68
Figura 5.31 – Corrente no primário fase A (○), fase B (□) e fase C (Δ) do RNS6Yd na MODELS	68
Figura 5.32 – Circuito do transformador saturável trifásico no ATPDraw.	69
Figura 5.33 – Caixa de dados do transformador saturável trifásico no ATPDraw.	69
Figura 5.34 – Corrente no primário da MODELS na fase A (□) e no ATPDraw Fase A(○).	70
Figura 5.35 – Correntes no primário da MODELS na fase A (×), B(●) e C(■) e no ATPDraw Fase A(○), B(□) e C(Δ).....	70
Figura 5.36 – Curva $B \times H$ com laço de histerese.....	71
Figura 5.37 – Curva $B \times H$ com laço de histerese ampliado.....	71
Figura 5.38 – Corrente no primário do RNS6Yd na fase A (□) e no RNS6YdH com perdas por histerese Fase A(○).....	72
Figura 5.39 – Correntes no primário do RNS6Yd na fase A (×), B(●) e C(■) e no RNS6YdH Fase A(○), B(□) e C(Δ).....	72
Figura 5.40 – Ligação ZigZag-delta do Reator da MODELS.....	73
Figura 5.41 – Circuito do RNS9 na MODELS no ATP.....	74
Figura 5.42 – Dados de entrada da MODELS no ATP.....	74
Figura 5.43 – Curva $B \times H$ na MODELS.	74
Figura 5.44 – Tensões no Primário fase A (○), B (□) e C (Δ) do RNS9Zigd na MODELS.....	75
Figura 5.45 – Corrente no Primário fase A (○) do RNS9Zigd na MODELS.....	75
Figura 5.46 – Corrente no Primário fase A (○), B (□) e C (Δ) do RNS9Zigd na MODELS.....	75
Figura 5.47 – Corrente fase A no primário (□) RNS6Yd e (○) RNS9Zigd na MODELS.....	76
Figura 5.48 – Corrente fase A no primário (□)RNS9Zigd na MODELS e (○) arq6 no ATP.....	76
Figura 5.49 – Correntes no primário do RNS9Zigd na MODLES fase A (×), B(●) e C(■) e no Arq6 no ATP Fase A(○), B(□) e C(Δ).....	77
Figura 5.50 – Corrente do RNS9Zigd na MODLES fase A considerando arquitetura do ATP.....	77
Figura 5.51 – Corrente fase A no primário (□)RNS9Zigd na MODELS e (○) arq6 no ATP.....	78
Figura 5.52 – Curva $B \times H$ com laço de histerese.....	78
Figura 5.53 – Corrente no primário do RNS9Zigd na fase A (□) e no RNS9ZigdH com perdas por histerese Fase A(○).....	79
Figura 5.54 – Correntes no primário do RNS9Zigd na fase A (×), B(●) e C(■) e no RNS9ZigdH Fase A(○), B(□) e C(Δ).....	79
Figura 5.55 – Ligação ZigZag-delta do Reator da MODELS.....	80
Figura 5.56 – Corrente no Primário fase A (○) do RNS9Zagd na MODELS.....	80

Figura 5.57 – Corrente no Primário fase A (○), B (□) e C (Δ) do RNS9Zagd na MODELS.....	81
Figura 5.58 – Corrente fase A no primário(○)RNS9Zagd, (□)RNS9Zigd e (Δ)RNS6Yd na MODELS.	81
Figura 5.59 – Corrente fase A no primário (□)RNS9Zagd na MODELS e (○) arq6 no ATP	82
Figura 5.60 – Correntes no primário do RNS9Zag na MODLES fase A (×), B(●)e C(■) e no Arq6 no ATP Fase A(○), B(□) e C(Δ).....	82
Figura 5.61 – Corrente do RNS9Zagd na MODLES fase A considerando arquitetura com comprimentos iguais.....	83
Figura 5.62 – Corrente fase A no primário (□)RNS9Zagd na MODELS e (○) arq6 no ATP	83
Figura 5.63 – Corrente no primário do RNS9Zagd na fase A (□) e no RNS9ZagdH com perdas por histerese Fase A(○).....	84
Figura 5.64 – Correntes no primário do RNS9Zagd na fase A (×), B(●)e C(■) e no RNS9ZagdH Fase A(○), B(□) e C(Δ).....	84
Figura 5.65 –Vista superior RNS699.	85
Figura 5.66 – Diagrama do RNS699 ligação em paralelo.....	86
Figura 5.67 – Circuito do RNS699 na MODELS no ATP	86
Figura 5.68 – Dados de entrada da MODELS no ATP.....	86
Figura 5.69 – Correntes no primário nos enrolamento 1 a 6 do RNS699.	87
Figura 5.70 – Correntes no primário nos enrolamento 7 a 9 do RNS699.	87
Figura 5.71 – Correntes de entrada na fase A do RNS699.	88
Figura 5.72 – Correntes de entrada nas fases A(○), B(□) e C(Δ) do RNS699.	88
Figura 5.73 – Corrente fase A no primário (□)RNS699 na MODELS e (○) arq6 no ATP.....	88
Figura 5.74 – Correntes no primário do RNS699 na MODLES fase A (×), B(●)e C(■) e no Arq6 no ATP Fase A(○), B(□) e C(Δ).....	89
Figura 5.75 – Arquitetura dos enrolamentos do RNS699 usado na MODELS	89
Figura 5.76 – Arquitetura dos enrolamentos do Reator usado no ATP.....	90
Figura 5.77 – Análise de Fourier da Corrente Total fase A do reator no ATP.....	91
Figura 5.78 – Análise de Fourier da Corrente Total fase A do reator na MODELS.....	91
Figura 5.79 – Análise de Fourier da Corrente Total fase A do reator na MODELS considerando os mesmo comprimentos magnéticos nos 9 núcleos.	91
Figura 5.80 – Corrente de entrada do RNS699 na fase A (□) e no RNS699H com perdas por histerese Fase A(○).....	92
Figura 5.81 – Correntes no primário do RNS699 na fase A (×), B(●)e C(■) e no RNS699H Fase A(○), B(□) e C(Δ).....	92
Figura 7.1 – Algoritmo 1: Fatorização LU	97
Figura 7.2 – Algoritmo 2: Solução do sistema.....	98

Figura 8.1 – Aplicação do método de integração trapezoidal	102
Figura 8.2 – Circuito elétrico considerando uma indutância	103
Figura 8.3 – Circuito equivalente da figura 8.2.....	104

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Valores na MODELS e na rede elétrica.	13
Tabela 2.2 – Valores na MODELS e na rede elétrica.	16
Tabela 3.1 – Comparação corrente da Models e type 98 - 9 trechos.....	25
Tabela 3.2 – Fórmulas para calculo de ensaio em vazio	28
Tabela 3.3 – Fórmulas para calculo de ensaio em curto	29
Tabela 3.4 – Fórmulas para calculo dos parâmetros da dispersão	29
Tabela 5.1 – Curva B x H – 9 trechos.....	55
Tabela 5.2 – Dados entrada RNS1 monofásico	55
Tabela 5.3 – Dados das Perdas de dispersão	58
Tabela 5.4 – Dados da Curva $\lambda \times i$	58
Tabela 5.5 – Dados entrada RNS2 monofásico	59
Tabela 5.6 – Parâmetros do sistema teste do transformador monofásico.....	62
Tabela 5.7 – Dados da Curva $\lambda \times i$	64
Tabela 5.8 – Comparações da corrente nos teste do transformador.....	65
Tabela 5.9 – Dados entrada RNS6 Trifásico Estrela-Delta	66
Tabela 5.10 – Dados da Curva $\lambda \times i$	69
Tabela 5.11 – Comparações das correntes do RNS6Yd na MODELS e ATP	70
Tabela 5.12 – Comparações das correntes do RNS6Yd e do RNS6YdH com perdas histerese	72
Tabela 5.13 – Dados entrada RNS9 Trifásico ZigZag-Delta	73
Tabela 5.14 – Comparações das correntes do RNS9Zigd da MODELS e do Arq6 no ATP.....	77
Tabela 5.15 – Comparações das correntes do RNS9Zigd e do RNS9ZigdH com perdas histerese.	79
Tabela 5.16 – Comparações das correntes do RNS9Zagd da MODELS e do Arq6 no ATP	82
Tabela 5.17 – Comparações das correntes do RNS9Zagd e do RNS9ZagdH com perdas histerese.....	84
Tabela 5.18 – Comparações das correntes do RNS9Zagd da MODELS e do Arq6 no ATP	89
Tabela 5.19 – Comparações das correntes do RNS699 e do RNS699H com perdas histerese	93

Lista de Abreviaturas

UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
DEE	Departamento de Engenharia Elétrica
LDSP	Laboratório Digital de Sistema de Potência
RNS	Reator Naturalmente Saturado
PSCAD	Power Systems Computer Aided Design
EMTP	Electromagnetic Transient Program
ATP	Alternative Transient Program
BPA	Bonneville Power administration
EMTDC	Electromagnetic Transient for Direct Current
HVDC	Direct Current High Voltage
TACS	Análise transitória de sistemas de controle
UMEC	Circuito Equivalente Magnético Unificado
FMM	Força Magnetomotriz
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão

Lista de Símbolos

λ	Fluxo concatenado [Wb·esp]
L	Indutância [H]
N	Número de espiras
V	Tensão [V]
i	Corrente [A]
Z_c	Impedância complexa da carga [Ω]
Y	Admitância [S]
ins	Corrente no passo de tempo anterior [A]
Δt	Tempo de intervalos nas simulações [seg]
$v(t-\Delta t)$	Tensão no passo tempo anterior [V];
ϕ	Fluxo magnético [Wb]
$\phi_{m\acute{a}x}$	Fluxo magnético máximo [Wb]
\mathfrak{R}	Relutância [A/Wb]
f	Frequência do sistema [Hz]
e(t)	Tensão no tempo [V]
I_o	Corrente em vazio [A]
P_{fe}	Perdas no ferro [W]
R_M	Resistência no ramo de Magnetização [Ω]
I_{cc}	Corrente em curto circuito
Z%	Impedância Percentual
Z	Impedância [Ω]
R%	Resistência Percentual
R	Resistência [Ω]
X	Reatância [Ω]
θ	Ramo do circuito magnético
P	Permeância [Wb/A]
[A]	Matriz de ligação de ramo de nó
[P]	Matriz contendo as permeância dos ramos
[N]	Matriz diagonal contendo os números de espiras
[M]	Matriz resultante no ramo
[Mss]	Matriz resultante no ramo parte FMM
[Ps]	Matriz contendo as permeância dos ramos na parte FMM
[Ns]	Matriz diagonal contendo os números de espiras na parte FMM

L_w	Comprimento do winding [m]
A_w	Área do winding do núcleo [m ²]
A_y	Área do yoke [m ²]
L_y	Comprimento do yoke [m]
A_r	Área do retorno [m ²]
L_y	Comprimento do retorno [m]
ω	Frequência angular [rad/s]
t	Tempo [s]
L_d	Indutância de dispersão [H]
L_s	Indutância de sequencia zero ou retorno [H]
P_d	Permeância de dispersão [Wb/A]
P_s	Permeância de sequencia zero ou retorno [Wb/A]
\mathcal{B}	Densidade de fluxo magnético [T]
\mathcal{H}	Campo magnético [A/m]
A	Área da seção transversal do circuito magnético do RNS [m ²]
l	Comprimento médio [m]
μ	Permeabilidade magnética [T.m/A]
ϕ_d	Fluxo magnético de dispersão [Wb]
ϕ_s	Fluxo magnético na sequencia magnética ou retorno [Wb]
ϕ_y	Fluxo magnético no yoke [Wb]

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

1.1- Considerações Iniciais

Atualmente existem diversos estudos na área de estabilidade de tensão no sistema elétrico buscando soluções nas conformidades dos padrões das tensões. As soluções mais tradicionais e de menor custo são os processo de compensação reativa formandos por reatores lineares e capacitores. Os capacitores e indutores têm a função de estabilizar a tensão nas barras da subestação e reduzir as sobretensões internas e as perdas de energia na linha de transmissão.

Uma outra importante parcela dos estudos sobre a estabilidade de tensão vem sendo direcionada para reatores a núcleo saturado que vem crescendo no mercado devido sua simplicidade operacional, baixa exigência de manutenção e custo competitivo. Sua principal característica está na não linearidade da tensão de operação obtido pela curva $B \times H$ do material que constitui o núcleo magnético. [1]

Um das peculiaridades operacionais dos reatores a núcleo saturado é a complexidade para simulações computacionais. O software ATP (*Alternative Transient Program*) é umas das ferramentas computacionais mais utilizadas em estudos transitórios eletromagnéticos no sistema elétrico. No entanto, a representação dos modelos de reatores a núcleo naturalmente saturado representam grandes desafios, principalmente no que tangem às características magnéticas dos equipamentos. Esta lacuna disponibilizou à busca de novas soluções referente ao assunto que constitui esta dissertação, ou seja, a utilização da linguagem MODELS do ATP para representar um modelo de reatores a núcleo saturado que busca a representação das características magnéticas.

A rotina MODELS foi desenvolvida por *Laurent Dubé* é considerada uma ferramenta moderna de simulação de algoritmos criados pelo próprio usuário.

Os principais objetivos da MODELS são:

- Possibilitar ao usuário do ATP o desenvolvimento de modelos dos componentes da rede elétrica e de algoritmos de controle não disponíveis no programa;
- Possibilitar ao usuário do ATP o desenvolvimento de modelos próprios dos componentes da rede elétrica aperfeiçoando e melhorando a resposta nos modelos do programa ATP e determinando suas condições iniciais;
- Facilitar ao usuário a flexibilidade de utilização de uma linguagem de programação de alto nível sem haver necessidade de interação em nível de programação do código fonte;

- O usuário não é limitado a um conjunto pré-definido de componentes, podendo criar bibliotecas de modelos e sub modelos em função de cada uma das aplicações.

Alguns usuários para representar os modelos de reatores naturalmente saturados no programa ATP, utiliza os indutores não lineares, no caso monofásico, e os transformadores saturados para trifásicos. Os Transformadores saturados baseiam em um fluxo uniforme assumido ao longo do núcleo e os enrolamentos de dispersão individuais são combinados. A Figura 1.1 representa modelo magnético dos transformadores saturados [2]. A Figura 1.2 representa um modelo elétrico utilizado para representar os transformadores saturados no ATP.

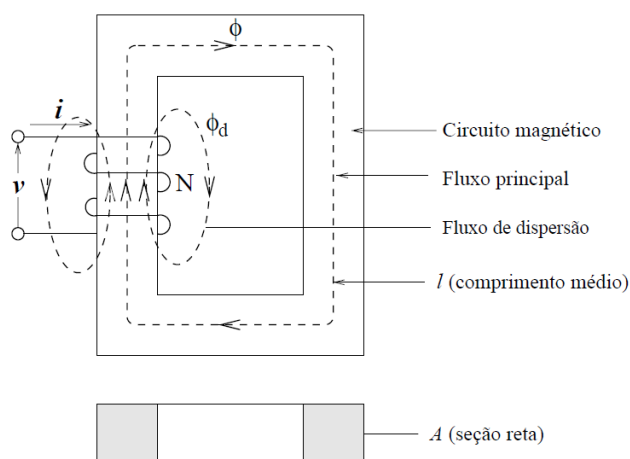


Figura 1.1 – Modelo magnético dos Transformadores saturados.

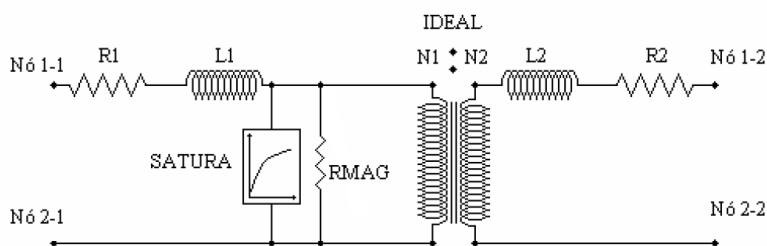


Figura 1.2 – Modelo Elétrico de Transformadores.

Onde:

- R_1 : Resistência enrolamento primário.
- R_2 : Resistência enrolamento secundário.
- L_1 : Indutância principal enrolamento primário.
- L_2 : Indutância principal enrolamento secundário.
- N_1 : Número de espiras das bobinas do primário.
- N_2 : Número de espiras das bobinas do secundário.
- v : Tensão [V]

i : Corrente [A]

ϕ : Fluxo magnético [Wb]

ϕ_d : Fluxo magnético de dispersão [Wb]

A : Área da seção transversal do circuito magnético [m²]

l : Comprimento médio [m]

RMAG: Ramo de magnetização [Ω].

Devido às dificuldades de representar as características magnéticas contidas nos reatores e transformadores saturados no programa ATP, este trabalho tem como proposta o desenvolvimento de modelos de reatores naturalmente saturados usando o circuito equivalente magnético unificado (UMEC), um modelo que calcula o fluxo magnético no ramo em cada etapa de tempo resultando numa matriz admitância adicionada nos terminais de um circuito equivalente de Norton. Esse modelo é muito utilizado em programas transitórios de sistema com alimentação em corrente contínua como o PSCAD/EMTDC. A equação 1.1 representa o circuito equivalente de Norton do modelo UMEC para transformadores monofásicos com dois enrolamentos.

$$\begin{pmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{12} & y_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} i_{ns1}(t) \\ i_{ns2}(t) \end{pmatrix}, \quad (1.1)$$

Esse modelo UMEC será desenvolvido na rotina da MODELS do ATP para simular reatores e transformadores naturalmente saturados com várias características de enrolamentos e de núcleos para analisar e aprimorar seus circuitos magnéticos.

Uns dos projetos desenvolvidos pelo Grupo de Engenharia Elétrica e Sistema de Potência da Universidade Federal de Pernambuco foi um reator naturalmente saturado de 9 núcleos com esquema de conexão paralela dos enrolamentos. O presente trabalho apresenta uma comparação de dados simulados desse modelo de reator naturalmente saturado simulado pelo LDSP no ATP e o mesmo reator desenvolvido no modelo UMEC e simulado na rotina da MODELS.

1.2 Objetivos pretendidos

O presente trabalho tem os seguintes objetivos:

- Apresentação da linguagem MODELS do software ATP, assim como, suas funcionalidades, criação de novo modelos e interação com rede elétrica.
- Modelar reatores naturalmente saturado monofásico e trifásico usando o método de circuito equivalente magnético unificado – UMEC.
- Desenvolver algoritmo do modelo de reatores naturalmente saturados usando o método UMEC na linguagem MODELS no ATP. Permitindo desse modo o detalhamento do

circuito magnético dos reatores naturalmente saturados em programas transitórios eletromagnéticos.

- Apresentar as simulações e resultados obtidos do modelo desenvolvido pelo UMEC na rotina MODELS com várias características de reatores naturalmente saturados e suas comparações com os modelos do software ATP.

1.3 Apresentação do trabalho

Este trabalho é dividido em 06 capítulos, conforme exposto:

- Capítulo 2 – Neste capítulo serão apresentados o estudo da linguagem MODELS do software ATP que permite que o usuário do ATP especifique e modifique o valor de parâmetros numéricos, para controlar a operação de componentes elétricos do sistema simulado, além da criação de novos modelos elétricos.
- Capítulo 3 – Neste capítulo são apresentados os modelos matemáticos que são utilizados para representar os reatores e transformadores saturados no software ATP, o modelo de aproximação linear por trechos que representa os indutores não lineares e o modelo de circuito equivalente *Steinmetz* em transformadores saturados.
- Capítulo 4 – Neste capítulo serão mostrados a modelagem de reatores saturado usando circuito equivalente magnético unificado fornecendo uma interface de equivalente de Norton nos terminais dos reatores saturáveis monofásicos e trifásicos com dois, seis e nove enrolamentos. E o desenvolvimento do algoritmo do modelo na linguagem MODELS do ATP.
- Capítulo 5 – Neste capítulo serão mostrados as simulações e comparações do modelo UMEC desenvolvido na MODELS com as simulações desenvolvidas no ATP.
- Capítulo 6 – Apresenta as conclusões do trabalho, além de sugestão para trabalhos posteriores relativos ao tema.

CAPITULO 2

PROGRAMAS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

As empresas vinculadas à área de energia elétrica procuram programas que resolvam os seus problemas mais rotineiros, que tenha facilidade de uso e simplicidade na entrada de dados, facilidade e diversas alternativas para a saída de dados e principalmente confiabilidade em seus resultados. A versão original do programa de transitório eletromagnético usando à técnica da integração numérica teve início na década de 60 com *Dommel, H. W.*, na Alemanha Ocidental onde a primeira versão do mesmo tinha aproximadamente 1500 instruções em FORTRAN. Novas rotinas foram acrescentadas ao programa original até chegar em torno de 6000 instruções em 1973 na BPA (*Bonneville Power administration*). Na BPA, o programa, basicamente originado por *Dommel*, se desenvolveu com o *Dr. W. Scott Mayer* e outros engenheiros dos EUA e de diversos países onde ficou conhecido por EMTP (Electromagnetic Transients Program) o qual é utilizado no Brasil desde 1975 sendo que na década de 80 chegou a ter mais de 100.000 (cem mil) instruções FORTRAN, uma vez que a filosofia de tal programa é conter todas as rotinas que foram desenvolvidas para as mais diversas aplicações [3].

Os programas de transitórios eletromagnéticos são hoje amplamente aceitos como uma ferramenta para a simulações do sistema elétricos de potência que são sensíveis a campos relativamente rápidos e interações entre componentes. Muitas razões levam a prática dessa ferramenta computacional e tornam indispensáveis na modelagem e simulações de redes e sistemas, tais como:

- Verificação de falhas eventuais de um sistema antes mesmo dele ser implantado;
- Dimensionamento dos dispositivos de proteção da rede;
- Economia no custo;
- Análise e compreensão total do sistema;
- Eficiência dos equipamentos do sistema.

A solução das equações diferenciais dos elementos dos circuitos dos programas de transitórios eletromagnéticos é usando como base no algoritmo proposto por *Dommel* produzido para simulação de fenômenos transitórios na rede elétrica. As técnicas de simulação no domínio do tempo baseiam na aplicação da regra de integração trapezoidal para representação de elementos que usa a simplificação de problemas através da transformação de um conjunto de equações diferenciais em um conjunto equivalente de equações algébricas [4].

A aplicação do método integração trapezoidal para indutores, por exemplo, é determinado através das equações:

Equação da tensão no indutor:

$$v_l(t) = L \frac{di_l(t)}{dt}, \quad (2.1)$$

Integrando no intervalo $t-\Delta t$ a t e aplicando-se o método trapezoidal obtém-se:

$$i_l(t) = Y_l * v_l(t) + i_{nl}, \quad (2.2)$$

$$Y_l = \frac{\Delta t}{2L}, \quad (2.3)$$

$$i_{nl} = i_l(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2L} * v(t - \Delta t), \quad (2.4)$$

Onde:

v_l : Tensão do indutor [V];

L : Indutância [H];

i_l : Corrente do indutor [A];

Y_l : Admitância do indutor [S];

Δt : Tempo de intervalos nas simulações [seg];

$v(t-\Delta t)$: Tensão no passo tempo anterior [V];

i_{nl} : Corrente no passo de tempo anterior [A].

O circuito aplicado a regra de integração trapezoidal para indutores é representado na Figura 2.1.

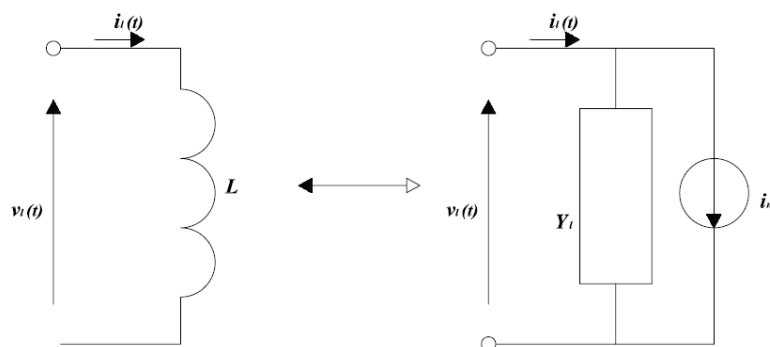


Figura 2.1 – Circuito aplicado à regra de integração trapezoidal para indutor.

Um estudo mais detalhado sobre a Integração Trapezoidal encontra-se no Anexo 8.1.

2.1 – Software ATP

O ATP (*Alternative Transients Program*) é considerado um dos mais amplos sistemas utilizados para simulação digital de fenômenos transientes eletromagnéticos, bem como de natureza eletromecânica em sistemas elétricos de potência. Com este programa, redes complexas e sistemas

de controle com estruturas arbitrárias podem ser simulados. O ATP tem facilidade no modelamento e importantes características adicionais como a análise digital de transientes.

Para facilitar a comunicação com o usuário os estudos de transitórios eletromagnéticos são realizados através do ATP e são desenvolvidas pelo seu aplicativo ATPDraw.

O programa ATPDraw consiste numa interface gráfica de processamento de arquivos de dados de entrada da rede a ser simulada. Com o uso desta ferramenta o usuário pode construir um circuito elétrico selecionando modelos pré-definidos de componentes para os principais elementos de uma rede elétrica, sendo que o programa cria automaticamente o arquivo de entrada correspondente do ATP, em formato texto. Têm-se aproximadamente 70 componentes de rede pré-definidos, 28 objetos da TACS (análise transitória de sistemas de controle) e também é possível criar seus próprios componentes através da ferramenta MODELS, o software com seus principais componente estão representados na Figura 2.2.

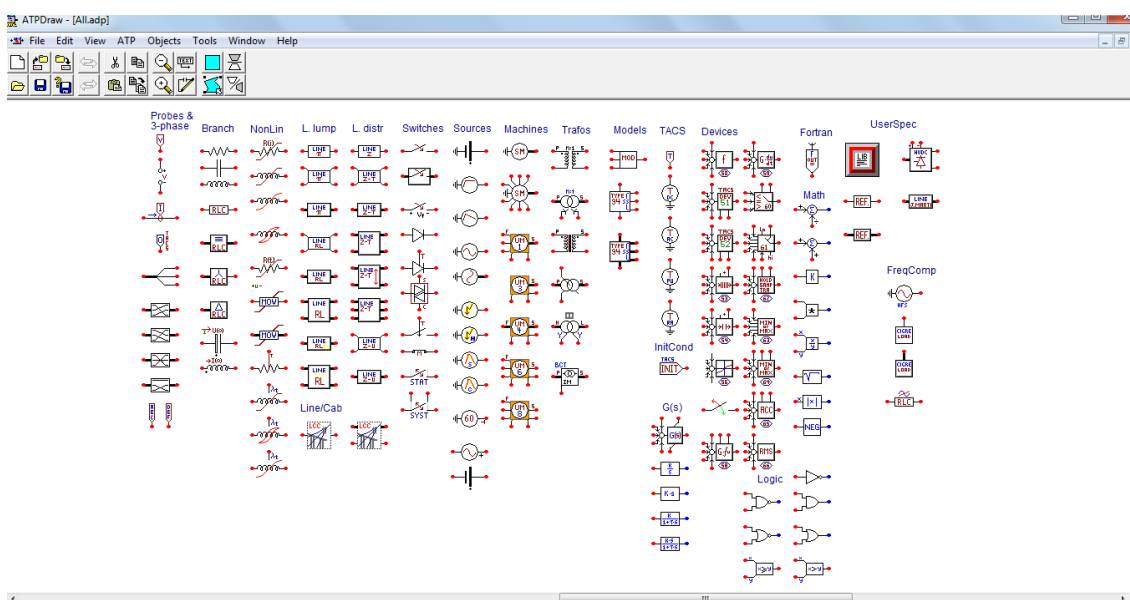


Figura 2.2 – Software ATP e seus principais componentes.

No Software ATP os usuários podem criar seus próprios modelos e fazer a interação com programa principal através de uma linguagem chamada MODELS, ferramenta escolhida neste trabalho para desenvolvimento de algoritmo para representar modelos de reatores naturalmente saturados representando suas características magnéticas.

2.2 – Linguagem MODELS no ATP

A MODELS é um conjunto de ferramentas de simulação para a representação e o estudo de sistemas variantes no tempo. Os modelos podem ser desenvolvidos separadamente, agrupados em uma ou mais bibliotecas de modelos e usados em outros modelos como blocos independentes.

A sintaxe da MODELS permite a representação de um sistema de acordo com sua estrutura funcional, suportando a descrição explícita da composição, sequência, concorrência, seleção,

repetição e replicação. A linguagem MODELS do ATP é muito semelhante à linguagem estruturada, como PASCAL e FORTRAN. Os modelos e funções usadas para descrever a operação de um sistema podem ser construídos em outra linguagem de programação que não seja a linguagem MODELS chamados *foreign models* (ou modelos externos, em tradução livre) que são programas escritos em linguagem C e podem ser inseridos dentro do código do próprio ATP. Essa operação só pode ser operada por usuários autorizados. [6]

Distinção entre a descrição de um modelo e seu uso, permitindo várias replicações independentes, de um modelo, com gerenciamento individual de simulação (passo de simulação, quantidade, condições iniciais, etc.). Modificações controladas dinamicamente dos valores das entradas e variáveis de um modelo durante o curso da simulação. Assim como a TACS a rotina MODELS foi desenvolvida por *Laurent Dubé* e é uma ferramenta moderna de simulação de sistema de controle utilizando algoritmos.

A MODELS permite que o usuário do ATP especifique e modifique o valor de parâmetros numéricos e/ou analógicos, para controlar a operação de componentes elétricos do sistema simulado, além de criação de novos modelos elétricos.

Esta ferramenta de simulação contida no programa ATP foi desenvolvida para substituir a TACS, permitindo ao usuário uma maior versatilidade nas modelagens de elementos de controle ou elementos não convencionais ou não disponíveis no conjunto de modelos para a representação na rede elétrica. Dado ao fato de que a TACS manteve maior velocidade de execução e simplicidade para tarefas menores, esta substituição não se efetivou tornando-se ambos dois poderosos recursos para o usuário do ATP.

A Figura 2.3 mostra a forma de organização dos comandos básicos, os quais devem ser colocados a seguir dos dados conhecidos como “MISCELLANEOUS DATA CARDS” e anteceder todos os dados da rede elétrica. [7]

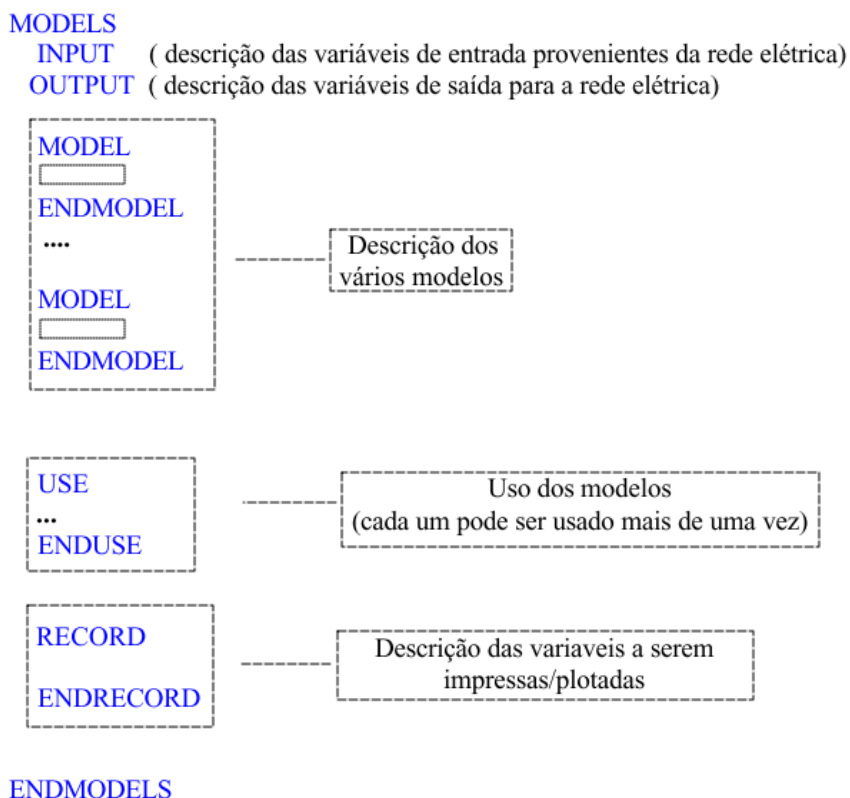


Figura 2.3 – Principais Instruções da *MODELS*

O grupo **MODEL** tem a finalidade de definir a modelagem do componente e o grupo **USE** tem a finalidade de especificar a sua utilização propriamente dita. Os dois grupos são divididos em seções, as quais são iniciadas por códigos que definem os parâmetros do componente e as condições de sua utilização. Enquanto a *MODELS* estiver ativada pode haver vários grupos de instruções do tipo **MODEL-ENDMODEL USE-ENDUSE**. A Figura 2.4 apresenta exemplos de instruções normalmente utilizadas no grupo **MODEL**.

```

MODEL (Nome do Modelo)
  INPUT
    Grandezas de Entrada
  DATA
    Dados de Entrada
  VAR
    Variáveis do Modelo
  OUTPUT
    Grandezas de saída
  HISTORY
    História da variáveis
  INIT
    Condições iniciais das variáveis
  ENDINIT
  EXEC
    Algoritmo do modelo
  ENDEXEC
ENDMODEL

```

Figura 2.4 – Instruções do Grupo *MODEL*

Os códigos DATA, CONST, INIT, etc... são os comandos, declarações e procedimentos, seguidos das informações apropriadas. Nem todas as seções tem que ser usadas num modelo específico nem a sequência são importantes. A exceção é a seção EXEC, a qual deve vir por último.

A palavra-chave MODELS, após as instruções iniciais do ATP, transfere a execução do programa para a rotina MODELS, da mesma forma que para qualquer outra rotina (TACS, por exemplo). A seção entre MODELS e MODEL é utilizada para a especificação dos canais de "input" e de "output", normalmente para fontes externas da rede do ATP e/ou sinais entre modelos.

As principais declarações da MODELS são:

- INPUT: Permite o usuário entrar com uma grandeza externa, isto é, a cada passo de integração será repassado para o modelo o valor da grandeza. As grandezas que podem ser repassadas para MODELS são [5]:
 1. (i) – Corrente através de uma chave;
 2. (v) – Tensão no nó;
 3. (switch) – Status de uma chave (aberta ou fechada);
 4. (mach) – Variável de uma máquina;
 5. (TACS) – Variável da TACS;
 6. (imssv) – Parte imaginária da tensão no nó;
 7. (imssi) – Parte imaginária da corrente através de uma chave;
 8. Variável de outro modelo da MODELS.
- OUTPUT: Permite que uma variável do modelo possa ser disponibilizada para o circuito. Geralmente é feito em situações de controle assim como na TACS [5].
- DATA: São dados de entrada especificados pelo usuário. Dentro do modelo estes parâmetros não podem ser especificados em outras declarações [5].
- CONST: Em certos modelos existem parâmetros que são constantes durante todo o tempo do programa. Esses parâmetros contidos nessa declaração não podem ser acessados pelos usuários durante a simulação [5].
- VAR: São escritas todas as variáveis do modelo. Nesta declaração não devem estar presentes as variáveis escritas em INPUT, DATA e CONST [5].
- HISTORY: Dependendo do contexto, deve-se especificar a história passada das variáveis, isto é, deve-se saber qual o valor dessa variável antes de começar a execução da simulação [5].
- INIT – ENDINIT: Permite que as variáveis possam ser inicializadas independentes, ou seja, permite ao usuário entrar com as condições iniciais das variáveis. Essa instrução também pode ser usada para realizar cálculos constantes, ou seja, cálculos que não são função do tempo de simulação [5].

- EXEC – ENDEXEC: São palavras chaves para o início e término da simulação do modelo, ou seja, são dentro dessa declaração que serão realizados os cálculos do algoritmo que dependem do tempo de simulação [5].
- TIMESTEP: Estabelece o passo de integração máximo (TIMESTEP MAX) e mínimo (TIMESTEP MIN) no qual a MODELS irá executar seus cálculos, ou seja, os cálculos executados na MODELS podem ter um passo de integração diferente do passo executado no ATPDraw. Essa declaração não é obrigatória e quando não for informado o passo de integração o mesmo será usado do ATPDraw. Essa função só pode ser feita na MODELS [5].

2.3 - Interação com a Rede Elétrica

A comunicação da MODELS com a rede elétrica é representada por comandos de entrada e saída conforme Figura 2.5.

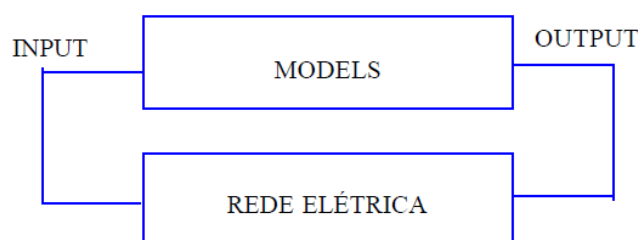


Figura 2.5 – *MODELS integrada com a rede elétrica.*

A interação da MODELS com a rede elétrica pode ser feita de duas formas distintas. Uma através do elemento *Type 94*, que permite não haver defasagem entre a solução da rede e a MODELS e a outra *Files (sup/mod)* onde as soluções da rede e das equações ficam defasadas de um passo de integração. [7]

2.3.1 Files (sup/mod)

Selecionando MODELS / Files (sup/mod) conforme figura 2.6, escolhendo o arquivo (.mod) contendo o programa da MODELS você cria automaticamente um objeto da MODELS. Os dados a serem inseridos no modelo deve ser preenchido na caixa de dialogo conforme a Figura 2.7.

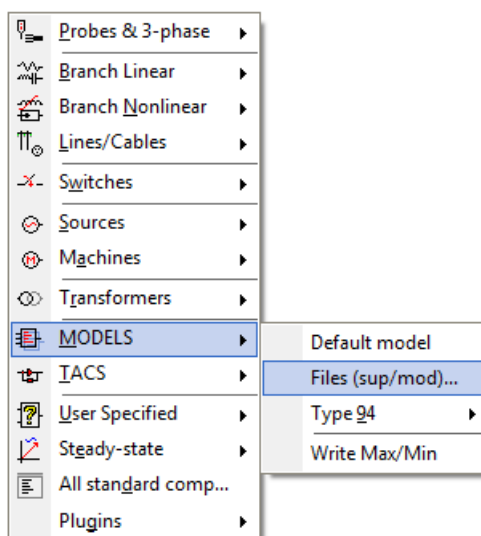


Figura 2.6 – Localização do arquivo *Files (sup/mod)* da *MODELS* no ATPDraw.

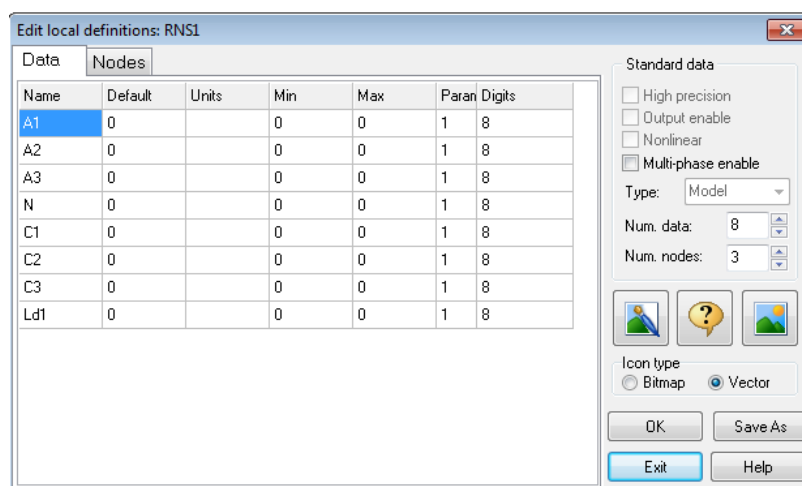


Figura 2.7 – Caixa de dialogo com dados da *Models*.

O elemento da *MODELS* formado no software ATPDraw pelo *Files* está representado na Figura 2.8.



Figura 2.8 – Elemento da *MODELS* formado pelo *Files (sup/mod)*.

A entrada e saída da *MODEL*, o uso do modelo e a interface com resto do circuito são manipulados pelo ATP[5]. O circuito completo no ATP contido na Figura 2.9, note que as entradas e saídas são informações contidas nos nós, por isso, deve ser representada por circuito fechado, não podendo colocar uma fonte diretamente na entrada e/ou saída na caixa da *MODELS*.

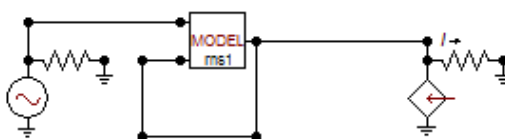


Figura 2.9 – Exemplo de um circuito da MODELS no ATPDraw usando files.

Uma simulação da interação da MODELS pelo componente files com a rede elétrica está representada na Figura 2.10 mostrando uma defasagem de um passo de tempo conforme mencionado acima. A Tabela 2.1 mostra os resultados defasados da MODELS e a rede elétrica.

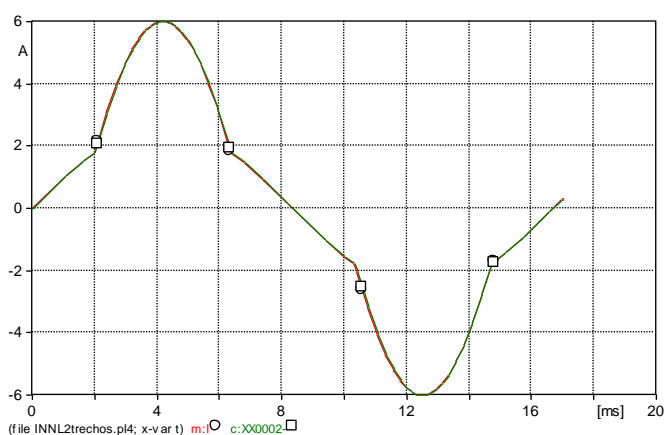


Figura 2.10 – Corrente na Saída da MODELS (○) e Corrente na Saída da rede elétrica (□).

Tabela 2.1 – Valores na MODELS e na rede elétrica.

t (s)	i (Models) (A)	i rede elétrica (A)
000000	000000	0000000
0,00025	0,24963	0000000
0,00050	0,49704	0,24963
0,00075	0,74005	0,49704
0,00100	0,97648	0,74005
0,00125	1,20420	0,97648
0,00150	1,42130	1,20420
0,00175	1,62580	1,42130
0,00200	1,81580	1,62580
0,00225	2,68480	1,81580
0,00250	3,46620	2,68480
0,00275	4,15240	3,46620
0,00300	4,73720	4,15240
0,00325	5,21550	4,73720
0,00350	5,58290	5,21550
0,00375	5,83630	5,58290
0,00400	5,97350	5,83630

2.3.2 Type 94:

A grande vantagem do componente *Type 94* é ele não ter defasagem de um passo de tempo da interface com EMTP como acontece com componente files (sup/mod). Ele pode ser representado diretamente no circuito como elemento não linear do EMTP.

O componente *Type 94* é visto pelo EMTP como caixa elétrica preta ligada ao circuito de uma ou mais ramificações. Ele executa uma função semelhante à instrução USE da MODELS. Em cada tipo de utilização os valores arbitrários podem ser atribuídos para os parâmetros de dados definidos na simulação da MODELS. São três subtipos do componente type 94 existentes: Thevenin, Iterated e Norton.[5]

- THEVENIN: No tipo de Thevenin, o componente vê o resto do circuito linear como um equivalente thevenen. As entradas são tensões de Thevenin e matriz resistência nos terminais do componente. O modelo calcula o valor da resultante corrente de passo de cada vez [5].
- ITERATED: No tipo iterativo, um grupo de componente não linear vê o resto do circuito linear como um equivalente de Thevenin e cada um deles calcula a corrente (output), correspondendo à tensão estimadas (inputs) fornecido por iteração no algoritmo do ATP [5].

Ambas abordagens fornecem uma solução sincronizado com o resto do circuito. No tipo de Thevenin, é o modelo que resolve a equação circuito de Thevenin. No tipo iterativo, que a solução é feita por ATP. Nos casos com apenas um componente não linear (que pode ser multi-fases), o tipo de Thevenin pode ser usado, e proporciona um tempo de execução mais rápida, uma vez que evita a iteração. O tipo iterativo permite conectar mais de um componente não linear (tipo-94 e outros) por sub-rede.

- NORTON: Para o tipo Norton, o circuito vê o componente como um equivalente de Norton, uma admitância, em paralelo com uma fonte de corrente. Em cada intervalo de tempo, o componente recebe os valores de tensão do nó como entradas, saídas e calcula como a admitância e fontes de corrente para ser usado na solução de circuito no instante de tempo seguinte. Nenhuma iteração é realizada por ATP [5].

No caso no Norton, quando tem os valores de mudança da admitância, ATP deve recalculer a matriz admitância do circuito, por causa do recálculo relativamente demorado, este tipo é mais bem usado devido raro mudança de valores de interações. Não há custo de execução em ter valores frequentemente em mudança das fontes de corrente. Sob estas condições, o tipo Norton é mais rápido do que as outras duas, pois o ATP não é necessário calcular um equivalente de Thevenin, em cada passo de tempo (necessário para Thevenin e Iterativo). A abordagem Norton também proporciona maior flexibilidade na representação do componente, uma vez que permite ao

utilizador controlar diretamente os valores na matriz de admitância da solução de ATP. Selecionando MODELS / Type 94 / THEV Figura 2.11, escolhendo o arquivo (.mod) contendo o programa da MODELS você cria automaticamente um objeto da MODELS. A caixa de dados a ser inserido pelo usuário no ATPDraw é representada na Figura 2.12.

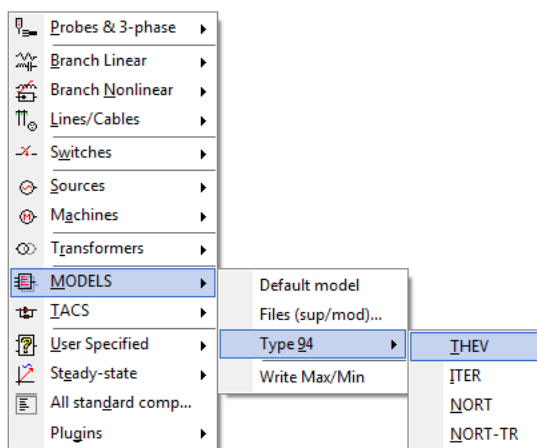


Figura 2.11 – Localização do arquivo Type 94 da MODELS no ATPDraw

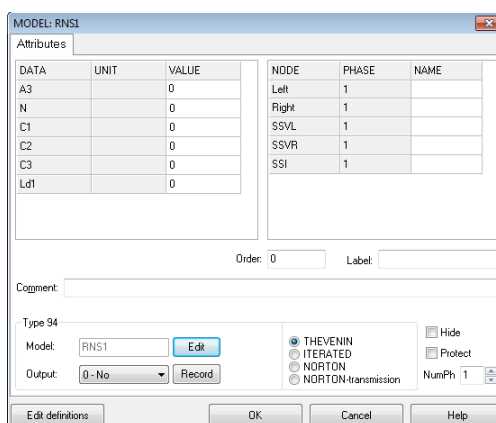


Figura 2.12 – Caixa de dialogo contendo os dados da componente Type 94 da MODELS

O elemento da MODELS representado no ATPDraw pelo Type 94 está contido na Figura 2.13.



Figura 2.13 – Elemento Type 94 da MODELS no ATPDraw.

O circuito completo no ATP contido na Figura 2.14, note que as entradas e saídas são informações diretamente do circuito, onde o mesmo não acontece anteriormente, onde as informações são adquiridas pelos nós dos circuitos de entrada e saída como a Figura 2.9.

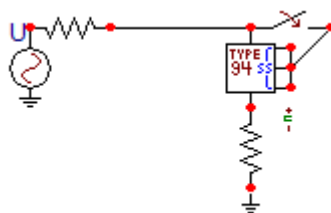


Figura 2.14 - Exemplo de um circuito da MODELS no ATPDraw usando Type 94.

Uma simulação da interação da MODELS pelo componente Type 94 com a rede elétrica está representada na figura 2.15 mostrando não ter defasagem de um passo de tempo conforme mencionado anteriormente. A Tabela 2.2 mostra os resultados idênticos da MODELS e a rede.

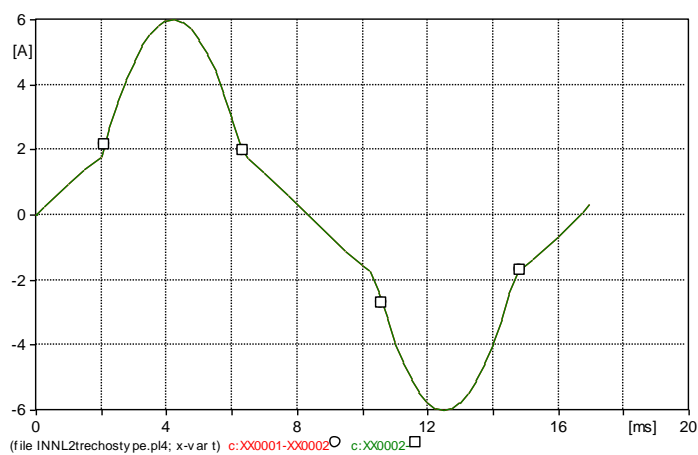


Figura 2.15 – Saída na MODELS (○) e Saída na rede elétrica (□).

Tabela 2.2 – Valores na MODELS e na rede elétrica.

t (s)	i (Models) (A)	i (rede elétrica) (A)
0,003125	0,47060	0,47060
0,003150	0,49029	0,49029
0,003175	0,51064	0,51064
0,003200	0,55715	0,55715
0,003225	0,60253	0,60253
0,003250	0,64676	0,64676
0,003275	0,68985	0,68985
0,003300	0,73180	0,73180
0,003325	0,77259	0,77259
0,003350	0,81223	0,81223
0,003375	0,85071	0,85071
0,003400	0,90043	0,90043
0,003425	1,00050	1,00050
0,003450	1,09730	1,09730
0,003475	1,19080	1,19080

CAPITULO 3

MODELO MATEMÁTICO DE REATORES NATURALMENTE SATURADO EM PROGRAMAS TRANSITÓRIO ELETROMAGNÉTICO

3.1 – Indutor não linear no EMTP

O indutor não linear também chamado de reator naturalmente saturado tem seu núcleo de forma fechada como o de um transformador sem enrolamento de potência no secundário. O material magnético não linear usado na maioria corresponde ao aço-silício de grãos orientados laminado a frio e sua característica $v \times i$ é mostrada na Figura 3.1. Antes de ser atingida a saturação a indutância apresentada pelo reator é alta e a corrente baixa, assim que a saturação é alcançada a indutância diminui e a corrente associada aumenta. Portanto o reator saturado pode ser usado para compensar a elevação de tensão quando um controle rígido não é exigido [8].

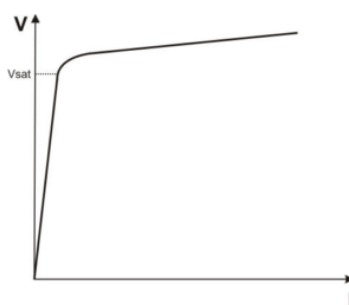


Figura 3.1 – Característica $V \times I$ do reator naturalmente saturado

Na busca para encontrar a conformidade e qualidade dos padrões da tensão no sistema elétrico de potência, as soluções mais tradicionais se fundamentam no processo de compensação reativa. A junção do reator naturalmente saturado incluindo capacitores, formando assim, os compensadores estático, torna-se mais eficiente o controle da tensão, pois o conjunto controla os afundamentos de tensão da rede elétrica, como destacado na Figura 3.2 [8].

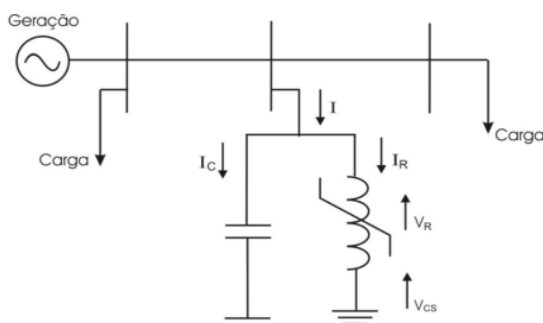


Figura 3.2 – Diagrama unifilar de um compensador estático.

A simulação de indutores não lineares em fenômenos transitórios eletromagnéticos pode ser apresentada pelo método de aproximação linear por trechos.

3.1.1 – Método de aproximação linear por trechos

Em programas de transitórios eletromagnéticos como ATP a curva $\lambda \times i$ de um indutor não linear é representada pelo método de aproximação linear por trechos é reproduzida pelo circuito que contém indutores lineares e chaves como na Figura 3.3. L_1 e L_2 são as inclinações do primeiro e segundo segmentos, respectivamente. Idealmente, a chave S_1 fecha em $\lambda = \Lambda_1$ e abre quando a condição $\lambda < \Lambda_1$ for atingida e assim respectivamente [9].

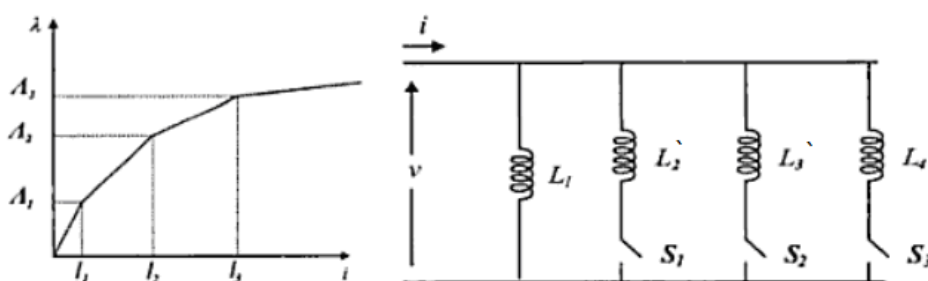


Figura 3.3 – Circuito simulador da curva $\lambda \times i$ de um indutor não linear.

O circuito simulador da curva $\lambda \times i$ de um indutor não linear para 2 trechos está contido na Figura 3.4.

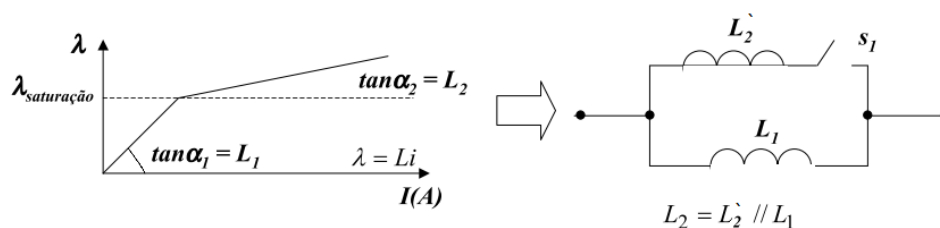


Figura 3.4 - Circuito simulador da curva $\lambda \times i$ com 2 trechos.

O fluxo total enlaçado na indutância não linear é a integral da tensão entre seus terminais:

$$\lambda(t) = \int v(t) dt , \quad (3.1)$$

O primeiro trecho a corrente é calculada pela fórmula:

$$i(t) = \frac{\lambda(t)}{L_1} , \quad (3.2)$$

O segundo trecho devido à mudança de indutância no trecho a corrente é:

$$i(t) = \frac{\lambda(t)}{L1} + \frac{\lambda(t) - \lambda1}{L2'} , \quad (3.3)$$

Sendo $L2'$:

$$L2 = L2' // L1 , \quad (3.4)$$

Ou seja,

$$L2' = \frac{1}{\frac{1}{L2} - \frac{1}{L1}} , \quad (3.5)$$

O mesmo procedimento é adotado quando a curva λ x i possui vários segmentos.

$$L3 = L3' // L2 , \quad (3.6)$$

No software ATPDraw o elemento que representa o indutor não linear representado pelo método de aproximação linear por trechos é o type 98 Figura 3.5.



Figura 3.5 – Indutor não linear do software ATPDraw.

A localização do componente Type 98 no ATPDraw está na Figura 3.6.

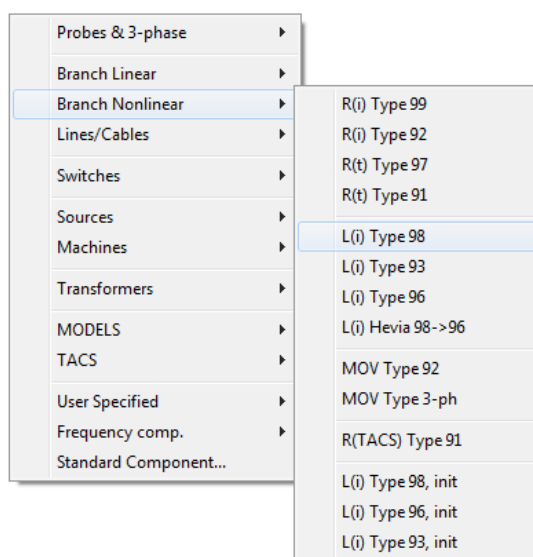


Figura 3.6 – Localização do indutor não linear type 98 no ATPDraw.

Problemas do método aproximação linear por trechos no ATPDraw:

- O trecho sempre inicia do ponto 0,0;
- Os pontos deverão sempre estar em ordem crescente;
- É permitida a entrada no máximo 17 pontos;
- O próximo ponto depois da mudança de indutância é calculado com valor anterior dando um pequeno erro do ponto Figura 3.7. Muitas vezes esse erro é desprezível.
- Somente resultados de grandezas elétricas como corrente e tensão.

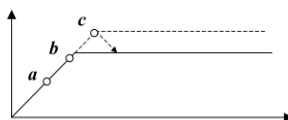


Figura 3.7 – Possível erro de mudança de trecho

A representação desse circuito em programas de transitórios eletromagnéticos não é trivial, será desenvolvido um modelo próprio do indutor não linear utilizando a rotina da MODELS. As vantagens de um modelo próprio é a eliminação dos problemas como a obtenção das medidas no tempo das grandezas magnéticas como o fluxo no tempo e curva $\lambda \times i$, pois nos programas a representação desses elementos somente obtém grandezas elétricas como tensão e a corrente. Outra grande vantagem do modelo próprio é a precisão e a correção dos pontos de mudança de trechos que o ATP calcula com pequeno erro.

A seguir serão detalhadas as etapas para criar um algoritmo de um modelo de indutor não linear próprio usando o método de aproximação linear de trechos:

Etapa 1: Primeiramente deve dividir a curva $\lambda \times i$ em trechos: obtendo os pontos iniciais e finais ($i_0, \lambda_0, i_1, \lambda_1, i_2, \lambda_2, i_3, \lambda_3, i_n, \lambda_n$) e obtendo as indutâncias de cada trechos.

- Trecho 1: $\lambda(t) \leq \lambda_1$

$$L_1 = \frac{\lambda_1 - \lambda_0}{i_1 - i_0}, \quad (3.7)$$

- Trecho 2: $\lambda_1 < \lambda(t) \leq \lambda_2$

$$L_2 = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{i_2 - i_1}, \quad (3.8)$$

- Trecho 3: $\lambda_2 < \lambda(t) \leq \lambda_3$

$$L_3 = \frac{\lambda_3 - \lambda_2}{i_3 - i_2}, \quad (3.9)$$

- Trecho n: $\lambda_{n-1} < \lambda(t) \leq \lambda_n$ assim respectivamente.

$$L_n = \frac{\lambda_{n-1} - \lambda_n}{i_{n-1} - i_n}, \quad (3.10)$$

No calculo da indutância a partir do segundo trechos, como na Figura 3.8 deve considerar as indutâncias anteriores.

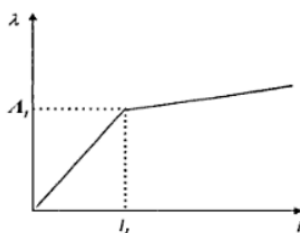


Figura 3.8 – Curva $\lambda \times i$ em dois trechos

Etapa 2: Indutância real das mudanças de trechos:

➤ Trecho 2 – L2':

$$L_2 = L_2' // L_1, \quad (3.11)$$

➤ Trecho 3 – L3':

$$L_3 = L_3' // L_2, \quad (3.12)$$

➤ Trecho n – Ln':

$$L_n = L_n' // L_{n-1}, \quad (3.13)$$

Etapa 3: Equações para o trecho 1: $\lambda(t) \leq \lambda_1$

➤ Tensão:

$$e(t) = e^* \cos(\omega t), \quad (3.14)$$

A fonte de tensão no software ATP já é senoidal calculando automaticamente não necessitando de colocar a equação.

➤ Fluxo concatenado

$$\lambda(t) = \int e(t) dt, \quad (3.15)$$

➤ Corrente:

$$i(t) = \frac{\lambda(t)}{L_1}, \quad (3.16)$$

Etapa 4: Equações para trecho 2: $\lambda(t) > \lambda_1$

➤ Corrente:

$$i(t) = \frac{\lambda(t)}{L_1} + \frac{\lambda(t) - \lambda_1}{L_2'}, \quad (3.17)$$

As etapas seguintes dependem da quantidade de trechos obtidos pela curva $\lambda \times i$, e são repetitivas a etapa 4, adicionando a indutância do próximo trecho.

$$i(t) = \frac{\lambda(t)}{L_{n-1}} + \frac{\lambda(t) - \lambda_{n-1}}{L_n'}, \quad (3.18)$$

Os pontos de uma curva $\lambda \times i$ do indutor não linear utilizada para esse programa têm 48 pontos, a curva está representada na Figura 3.9.

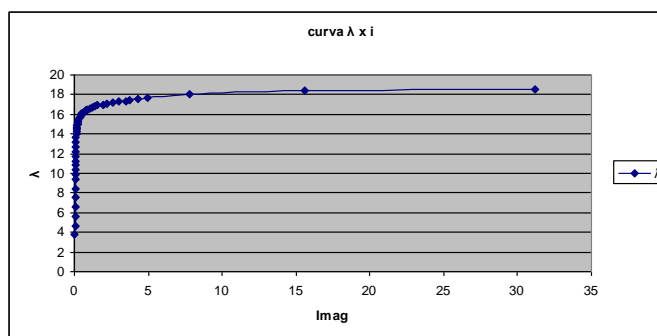


Figura 3.9 – Curva $\lambda \times i$ de um indutor não linear.

A figura 3.10 representa o algoritmo da curva λ x i pelo método de aproximação linear por trechos.

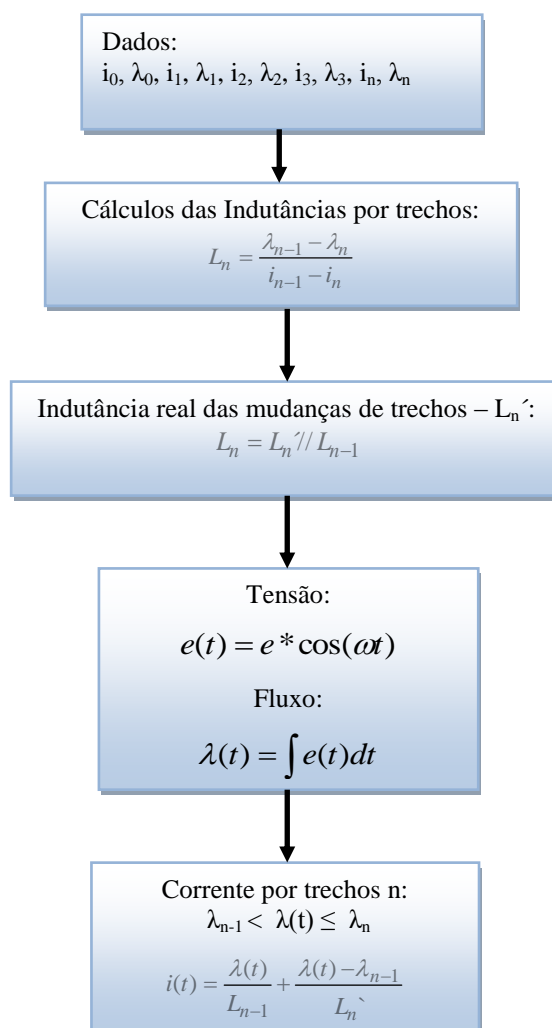


Figura 3.10 - Algoritmo Curva λ x i pelo método de aproximação linear por trechos

Pelo método de aproximação linear por trechos a tabela de pontos da curva deve ser dividida no mínimo 2 trechos. Quando mais trechos mais aproximado são os resultados, dessa forma um numero de trechos que atingiu resultados satisfatório foram de 9 trechos.

Utilizando a curva λ x i da figura 3.9, dividindo em 9 trechos.

- Trecho 1: $0,037227 < i \leq 0,063283$ $3,753984 < \lambda \leq 8,446464$
- Trecho 2: $0,063283 < i \leq 0,082394$ $8,446464 < \lambda \leq 11,73120$
- Trecho 3: $0,082394 < i \leq 0,142699$ $11,73120 < \lambda \leq 14,26514$
- Trecho 4: $0,142699 < i \leq 0,238245$ $14,26514 < \lambda \leq 15,20364$
- Trecho 5: $0,238245 < i \leq 0,508756$ $15,20364 < \lambda \leq 16,04828$
- Trecho 6: $0,508756 < i \leq 0,881015$ $16,04828 < \lambda \leq 16,517530$
- Trecho 7: $0,881015 < i \leq 1,910935$ $16,51753 < \lambda \leq 16,986780$
- Trecho 8: $1,910935 < i \leq 3,722597$ $16,98678 < \lambda \leq 17,456030$

- Trecho 9: $3,722597 < i \leq 31,18636$ $17,45603 < \lambda \leq 18,488370$

Desenvolvendo o algoritmo da Figura 3.10 para representar o indutor não linear pelo método de aproximação linear por 9 trechos utilizando os pontos da curva da figura 3.9. O circuito da MODELS no ATPDraw é representado na figura 3.11 e sua caixa de dados na figura 3.12.

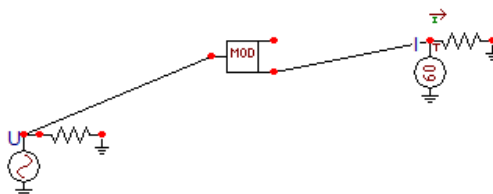


Figura 3.11 – Circuito da MODELS 9 trechos no ATPDraw.

DATA	VALUE	NODE	PHASE	NAME
i6	0.881015	v	1	××0004
i6	16.51753	i	1	××0007
i7	1.910935	flu	1	××0003
i7	16.98678			
i8	3.722597			
i8	17.45603			
i9	31.18636			
i9	18.48837			

Order: 0 Label:

Comment:

Model file: C:\ATP_CBUE\Mod\INLT9.n Use As: INLT9

Buttons: OK, Cancel, Help

Figura 3.12 – Caixa de dados da MODELS Indutor para 9 trechos.

A corrente de saída e a curva $\lambda x i$ da MODELS é representada na figura 3.13 e 3.14.

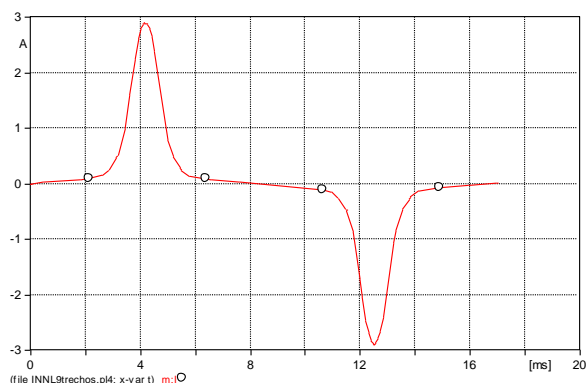


Figura 3.13 – Corrente na saída da MODELS 9 trechos.

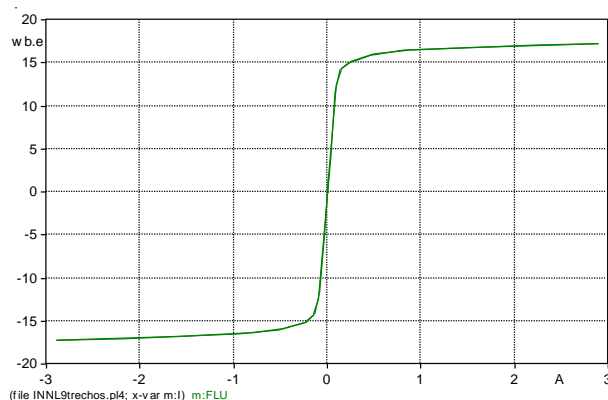


Figura 3.14 – Curva $\lambda x i$ na MODELS.

A. Comparação com componente Type 98 no ATPDraw:

Um dos elementos que representa um indutor não linear no ATP é o *TYPE 98*, o circuito está montado na Figura 3.15 e sua caixa de dados na Figura 3.16 afim de comparar o modelo próprio da MODELS utilizando o método de aproximação linear por trechos com componente type 98 no ATP:

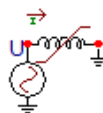


Figura 3.15 – Circuito no ATPDraw no Type 98

I [A]	Fluxlink [wb-T]
0.063293	8.446464
0.062394	11.7312
0.142639	14.26514
0.238245	15.20364
0.508756	16.04828
0.881015	16.51753
1.910935	16.98678
3.722597	17.45603
31.18636	18.48837

Figura 3.16 – Dados do componente Type 98

A Forma de onda da corrente representado pelo componente Type 98 no ATP está na Figura 3.17. Na Tabela 3.1 e na Figura 3.18 estão representados as comparações dos valores das correntes simulados na MODELS e no ATP pelo componente TYPE 98.

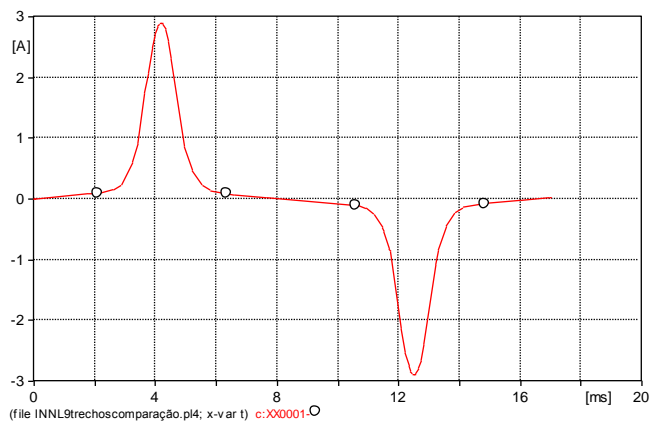


Figura 3.17 – Corrente no ATPDraw pelo Type 98

Tabela 3.1 – Comparação corrente da Models e type 98 - 9 trechos

t (s)	i (Models) (A)	i (Type 98) (A)
0,002825	0,22594	0,22594
0,002850	0,23389	0,23389
0,002875	0,24910	0,24956
0,002900	0,27324	0,27325
0,002925	0,29693	0,29695
0,002950	0,32020	0,32021
0,002975	0,34302	0,34304
0,003000	0,36540	0,36542
0,003025	0,38733	0,38735
0,003050	0,40882	0,40884
0,003075	0,42986	0,42989
0,003100	0,45046	0,45048
0,003125	0,47060	0,47062
0,003150	0,49029	0,49031
0,003175	0,51064	0,51715
0,003200	0,55715	0,55723
0,003225	0,60253	0,60260
0,003250	0,64676	0,64684
0,003275	0,68985	0,68994
0,003300	0,73180	0,73189
0,003325	0,77259	0,77268

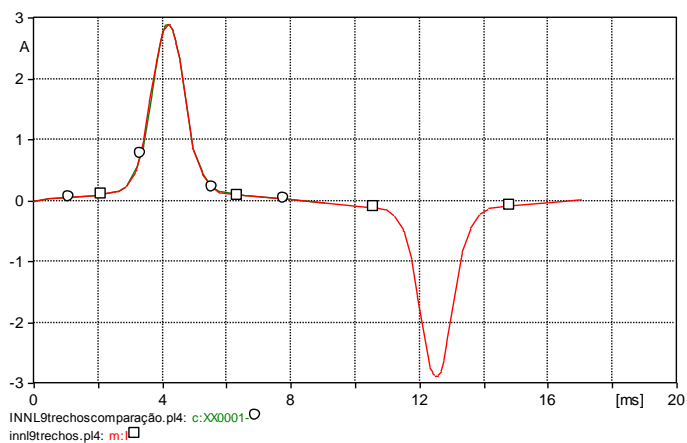


Figura 3.18 – Corrente no Type 98 (□) e na MODELS (○) com 9 trechos

Os resultados foram muito próximo mostrando que o modelo do indutor não linear utilizando a rotina da MODELS são muito satisfatórios, pois conseguimos representar o indutor não linear conforme o ATP e ainda obtendo as vantagens do modelo como as simulações de grandezas além das elétricas as grandezas magnéticas como Fluxo magnético e curva $\lambda \times i$.

3.2 – Reator Saturado no EMTP

O indutor não linear representada pelo *TYPE 98* no ATP é representada como um núcleo aberto com somente um enrolamento, ou seja, representa somente a curva $\lambda \times i$. A representação de reatores naturalmente saturados com núcleo fechado contendo o fluxo de principal e o fluxo de dispersão é representado pelo componente TRANSFORMADOR SATURAVEL. A Localização do componente no ATPDraw está na Figura 3.19.

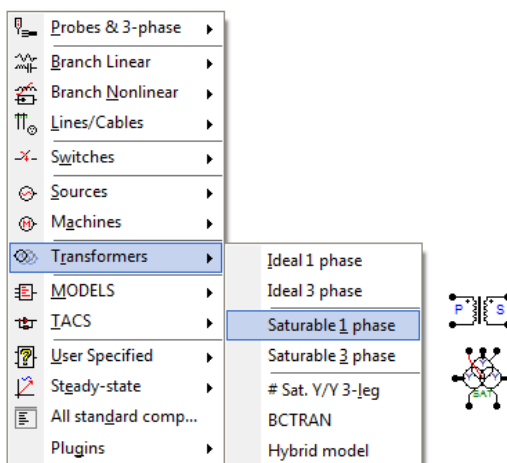


Figura 3.19 – Localização do transformador saturável no ATPDraw.

Quanto à disposição relativa dos enrolamentos o transformador poder ser de dois tipos:

- Shell Type ou Núcleo Envolvente: Os enrolamento são envolvidos pelo circuito magnético como na Figura 3.20 b e 3.21 b;
- Core Type ou Núcleo Envolvido: Os enrolamentos envolvem a coluna do núcleo como na Figura 3.20 a e 3.21 a.

O Shell Type com 5 leg que representa o retorno do fluxo chamado de fluxo de sequencia zero. O core type com 3 leg não tem o retorno e o fluxo de sequencia zero é obrigado a retornar pelo ar do lado fora dos enrolamentos, essa relutância é elevada. Devido ao espaço do ar a curva de magnetização da sequencia zero é quase linear. Portanto é razoável a aproximação da indutância L_0 como indutância linear. Essa indutância deve ser fornecida como dado de entrada do ATP para modelo representar esse tipo de transformador.

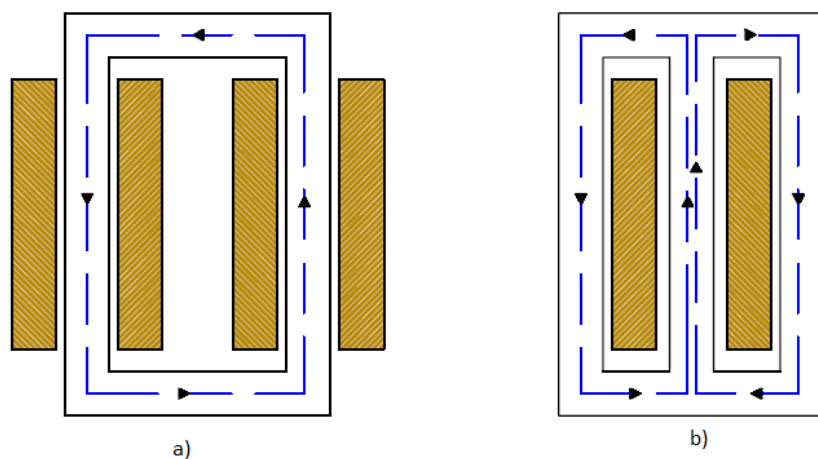


Figura 3.20 – Transformador monofásico tipo Core (a) e tipo Shell (b)

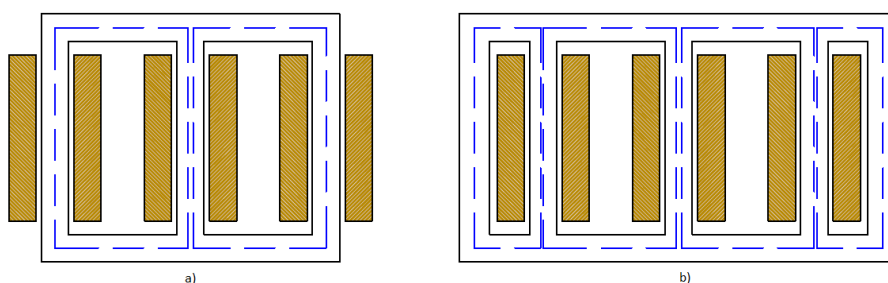


Figura 3.21 – Transformador trifásico tipo Core (a) e tipo Shell (b)

3.2.1 Transformadores com dois enrolamentos no ATP

As equações gerais do funcionamento do transformador com dois enrolamentos podem ser traduzidas através de um esquema elétrico equivalente como na Figura 3.22 que permite analisar o seu comportamento. Este esquema foi desenvolvido por *Steinmetz*.

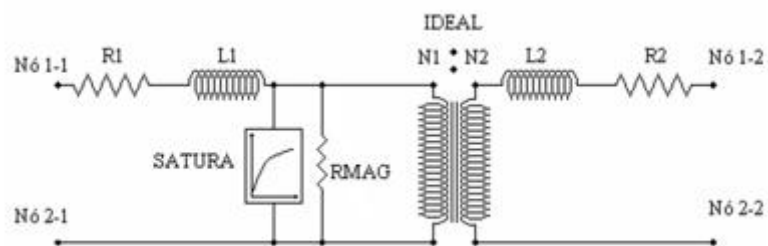


Figura 3.22 – Transformador com dois enrolamentos modelo Steinmetz .

Onde:

- R_1 e R_2 são resistências de dispersão dos enrolamentos 1 e 2.
- L_1 e L_2 são indutâncias de dispersão dos enrolamentos 1 e 2.
- Esses valores são obtidos a partir da impedância de curto-circuito.
- $RMAG$: Ramo de magnetização está no enrolamento 1 representa as perdas no ferro.

- **SATURA:** O efeito de saturação é representado pelo único reator não linear no circuito do enrolamento 1 representado pelo componente TYPE 98 contido no item 3.1. Usando o método de aproximação linear por trechos para criar o característica do valor necessário de fluxo e corrente.

Principais equações do modelo são:

Cálculo da corrente nominal:

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} * V_n}, \quad (3.19)$$

Onde:

I_n : Corrente nominal (A).

S_n : Potencia nominal (VA).

Cálculo do Fluxo maximo:

$$\Phi_{max} = \frac{V_n}{4,44 * N * f} [Wb], \quad (3.20)$$

Onde:

N: Numero de espira do enrolamento.

f: Frequência da rede [Hz].

V_n : Tensão nominal do enrolamento.

As equações usado desse modelo para ensaios em vazio estão na Tabela 3.2, para ensaios em curto na Tabela 3.3 e para ensaios em curto circuito na Tabela 3.4.

Tabela 3.2 – Fórmulas para calculo de ensaio em vazio

ENSAIO EM VAZIO	
Corrente em vazio:	$I_o = \frac{I_a + I_b + I_c}{3}$
Perdas no ferro:	$P_{fe} = P_o - 3 * R_{BT} * I_o^2$
Corrente em vazio %:	$I_o \% = \frac{I_o}{I_n} * 100$
Resistência no Ramo de Magnetização	$R_M = \frac{3 * V_n^2}{P_{fe}}$

Tabela 3.3 – Fórmulas para cálculo de ensaio em curto

ENSAIO EM CURTO	
Corrente em curto circuito:	$I_{cc} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} \cong I_n$
Impedância Percentual:	$Z\% = \frac{V_{cc}}{V_n} * 100$
Impedância Real:	$Z = \frac{V_n^2}{S_n} * \frac{Z\%}{100} [\Omega]$
Resistência Percentual	$R\% = \frac{W_{cc}}{S_n} * 100$
Resistência Real	$R = \frac{V_n^2}{S_n} * \frac{R\%}{100} [\Omega]$

Tabela 3.4 – Fórmulas para cálculo dos parâmetros da dispersão

PARÂMETROS DA DISPERSÃO	
ALTA TENSÃO	BAIXA TENSÃO
$Z_{AT} = \frac{V_{AT}^2 * Z_{cc}\%}{S * 100}$	$Z_{BT} = \frac{V_{BT}^2 * Z_{cc}\%}{S * 100}$
$R_{AT} = \frac{V_{AT}^2 * R_{cc}\%}{S * 100}$	$R_{BT} = \frac{V_{BT}^2 * R_{cc}\%}{S * 100}$
$X_{AT} = \sqrt{Z_{AT}^2 - R_{AT}^2}$	$X_{BT} = \sqrt{Z_{BT}^2 - R_{BT}^2}$
$L_1 = \frac{X_{AT}}{2 * w}$	$L_1 = \frac{X_{BT}}{2 * w}$
$R_1 = \frac{R_{AT}}{2}$	$R_1 = \frac{R_{BT}}{2}$

3.2.2 Transformadores com três enrolamentos no ATP

No ATP o modelo utilizado para transformador com três enrolamento é o mesmo modelo usado com dois enrolamento acrescentando a este mais uma malha ao circuito equivalente como mostra a Figura 3.23. A caixa de dados do componente do transformador saturável com três enrolamentos estão Figura 3.24. [5]

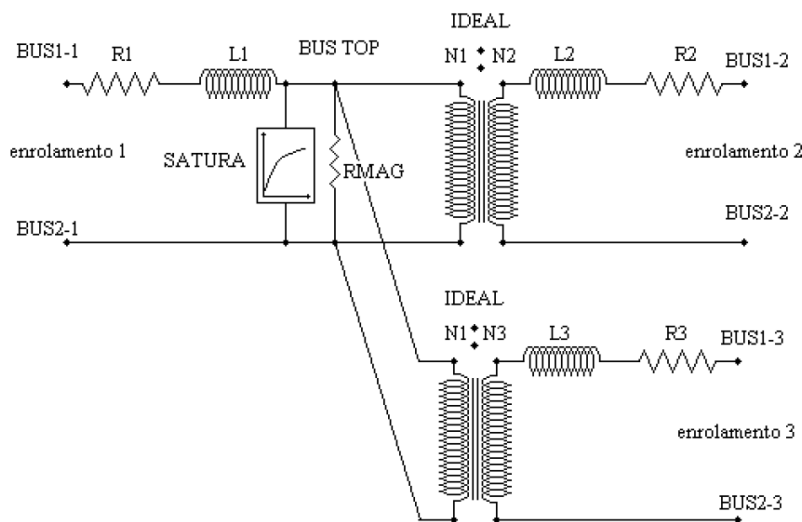


Figura 3.23 – Modelo de transformador com três enrolamentos.

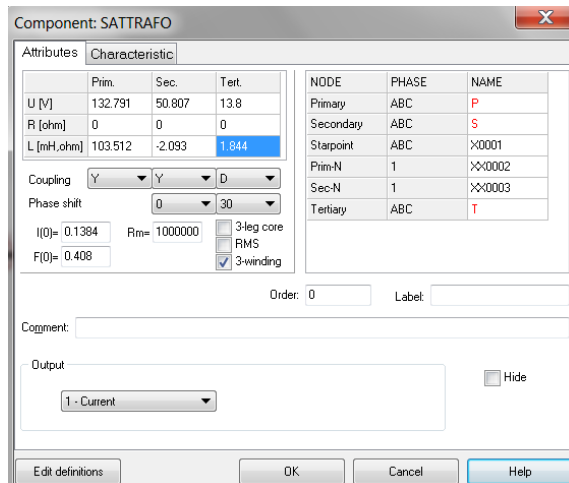


Figura 3.24 – Caixa de dados do componente do transformador saturável trifásico do ATP.

O modelo de transformador com três enrolamentos usado no ATP deve ter uma abordagem especial, pois dependendo do tipo de transformador, este pode apresentar impedância de dispersão negativa para um de seus enrolamentos, geralmente o secundário ou terciário. Os valores negativos para um ramo no ATP levam a uma instabilidade numérica, que é devida ao método numérico utilizado na solução da rede elétrica, deve ser consideradas aproximações sem grandes erros para corrigir a instabilidade numérica. O circuito elétrico representativo de um transformador de três enrolamentos pode ser representado na figura 3.25 [10].

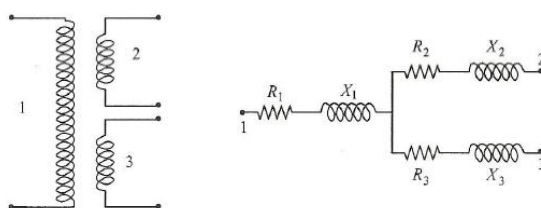


Figura 3.25 – Circuito elétrico do Transformador com três enrolamentos.

Os cálculos para determinar as impedâncias de dispersão são determinados pelo ensaio em curto-circuito. No caso do transformador de três enrolamentos são necessários três tipos de ensaios, cada um determinando a impedância de acoplamentos dos enrolamentos [10].

1º Ensaio:

- Curto circuito enrolamento 1 e 2;
- Enrolamento 3 Aberto;
- Determina impedância Z_{12} através do circuito equivalente:

$$Z_{12} = Z_1 + Z_2, \quad (3.21)$$

2º Ensaio:

- Curto circuito enrolamento 1 e 3;
- Enrolamento 2 Aberto;
- Determina impedância Z_{13} através do circuito equivalente:

$$Z_{13} = Z_1 + Z_3, \quad (3.22)$$

3º Ensaio:

- Curto circuito enrolamento 2 e 3;
- Enrolamento 1 Aberto;
- Determina impedância Z_{23} através do circuito equivalente:

$$Z_{23} = Z_2 + Z_3, \quad (3.23)$$

Onde:

$$Z_1 = R_1 + jX_1, \quad (3.24)$$

$$Z_2 = R_2 + jX_2, \quad (3.25)$$

$$Z_3 = R_3 + jX_3, \quad (3.26)$$

Com os valores de Z_{12} , Z_{13} , e Z_{23} são possíveis determinar a impedância de cada enrolamento.

$$Z_1 = \frac{Z_{12} + Z_{13} - Z_{23}}{2}, \quad (3.27)$$

$$Z_2 = \frac{Z_{12} + Z_{23} - Z_{13}}{2}, \quad (3.28)$$

$$Z_3 = \frac{Z_{13} + Z_{23} - Z_{12}}{2}, \quad (3.29)$$

Mesmo os valores de Z_{12} , Z_{13} , e Z_{23} sendo positivos, as equações mostram que, dependendo desses valores, o cálculo dos valores de Z_1 , Z_2 e Z_3 pode apresentar alguns resultados negativos.

Esses resultados negativos representam uma regulação de tensão negativa, devido a acoplamentos entre os enrolamentos no modelo matemático, podendo ocorrer instabilidade numérica em programas computacionais como o ATP.

Uma solução para evitar a instabilidade numérica deve ajustar os parâmetros seguintes:

1. Fazer $L_2 = 0$, por exemplo: 10^{-6} mH (nunca zero para evitar erro no ATP);
2. Ajustar o valor de L_1 e L_3 para manter os mesmos valores das impedâncias de dispersão Z_{12} e Z_{13} .

A figura 3.26 mostra um exemplo de instabilidade numérica no ATP causado pela impedância negativa do transformador de três enrolamentos [10].

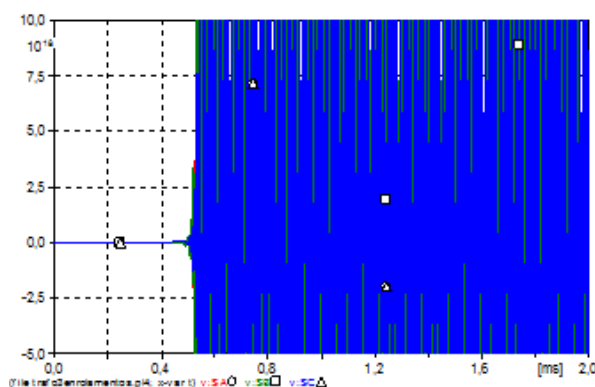


Figura 3.26 – Forma de Onda do ATP devido a instabilidade numérica.

Os resultados de ajustes poderem ser bons em relação aos acoplamentos dos enrolamentos primário-secundário e primário-terciário, mas pode apresentar inadequação nos enrolamentos secundário-terciário.

Um importante assunto sobre este modelo de transformador com três enrolamentos que o ATP utiliza é a arquitetura dos enrolamentos, nesse modelo, em cada coluna os enrolamentos são considerados acoplados com mesmo comprimento médio magnético conforme Figura 3.27.

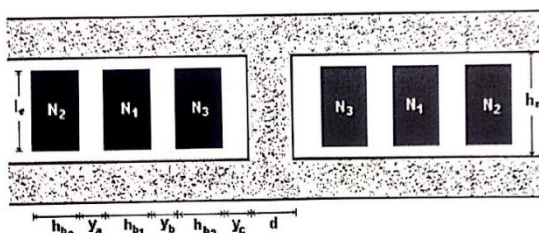


Figura 3.27 – Comprimento médio magnéticos com tamanho iguais dos enrolamentos do reator.

No caso de reatores com arquitetura dos enrolamentos projetados com comprimentos médios magnéticos diferente como na Figura 3.28, o resultados simulados poder ocorrer alterações. No Capítulo 5 é encontrado a comparações das duas arquiteturas dos enrolamentos e suas simulações.

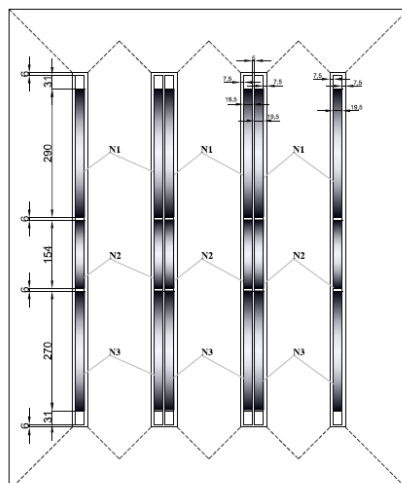


Figura 3.28 – *Comprimento médio magnéticos com tamanho diferentes dos enrolamentos do reator.*

Afim de buscar resultados mais satisfatórios em relação a análise do circuito magnético do reator, um outro tipo de modelo de reator saturado usando circuito equivalente magnético é proposto neste trabalho utilizando a rotina da MODELS do ATP.

CAPÍTULO 4

MODELANDO REATORES NATURALMENTE SATURADO USANDO CIRCUITO EQUIVALENTE MAGNÉTICO UNIFICADO

No capítulo 3 foi descrito os modelos de representações dos reatores naturalmente saturados no ATP. Uma outra representação de reatores saturados muito utilizada é o modelo fundamentado no princípio da dualidade, onde representa grandezas magnética por grandeza elétrica incluindo o acoplamento magnético. O modelo no princípio da dualidade o circuito equivalente tem um grande número de componentes tornando a sua aplicação não é muito viável no programa EMTP.

Devido à dificuldade da análise do circuito magnético com esses modelos o presente trabalho tem a proposta de modelo baseado na representação de equivalente de Norton como uma interface simples com programa EMTP e derivada da análise de circuito equivalente magnético. É o chamado modelo UMEC (Circuito equivalente magnético unificado).

Utilizando as vantagens do programa ATP em que os usuários podem criar seus próprios modelos, o trabalho propõe a implantação do modelo UMEC de reatores saturados na linguagem MODELS do ATP [4].

4.1 Representação do fluxo no ramo do Reator:

A representação do circuito equivalente magnético no ramo θ' , como na Figura 4.1, é mostrada em duas partes, a relutância do ramo (θ_{k1}) e força magnetomotriz do ramo (θ_{k2}). As características magnéticas individuais pode ser aplicada a cada ramo. Cada um dos enrolamentos do reator pode ser modelado como bobina com um ou vários ramos do circuito magnético equivalentes [4].

Onde:

θ : Ramo do circuito magnético;

ϕ : Fluxo magnético no ramo.

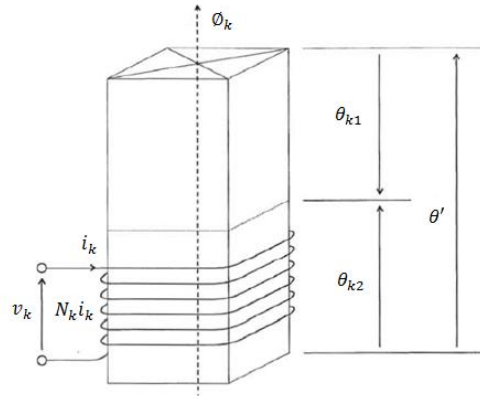


Figura 4.1 – Circuito magnético no Ramo do reator

A relação da relutância no ramo θ' pode ser descrita pela equação 4.1:

$$\theta_{k1} = \mathfrak{R}_k * \phi_k \quad (4.1)$$

A relação da no ramo 1 pode ser descrita pela equação 4.2:

$$\theta_{k2} = N_k * i_k \quad (4.2)$$

A equação 4.1 no domínio do tempo é dada:

$$\theta_{k1}(t) - \theta_{k1}(t - \Delta t) = \mathfrak{R}_k[\phi_k(t) - \phi_k(t - \Delta t)] \quad (4.3)$$

Assim:

$$\theta_{k1}(t) = \theta_{k1}(t - \Delta t) + \mathfrak{R}_k[\phi_k(t) - \phi_k(t - \Delta t)] \quad (4.4)$$

A relação entre a relutância e fluxo é:

$$\theta_{k1}(t) = R_k * \phi_k(t) + \theta_{nk} \quad (4.5)$$

Onde:

$$\theta_{nk} = \theta_{nk}(t - \Delta t) - \mathfrak{R}_k * \phi_k(t - \Delta t) \quad (4.6)$$

Considerando:

$$\theta' = \theta_{k2} - \theta_{k1} \quad (4.7)$$

Combinando a equação 4.7 e 4.2 com 4.6 obtemos:

$$\theta' = N_k * i_k - \mathfrak{R}_k * \phi_k - \theta_{nk} \quad (4.8)$$

Ou

$$\phi_k = P_k[N_k * i_k - \theta' - \theta_{nk}] \quad (4.9)$$

Onde a Permeância é:

$$P_k = \frac{1}{\mathfrak{R}_k} \quad (4.10)$$

Para núcleo de aço de grão orientado, a característica se torna mais íngreme abaixo da saturação, mais plana acima da saturação, e a transição ao redor da região do joelho fica mais nítida como na Figura 4.2. Presentemente, o núcleo não linear é representado sob a forma de permeância incremental na equação 4.9 podem ser reorganizados para:

$$\phi_k = P_k^* [N_k * i_k - \theta'] \quad (4.11)$$

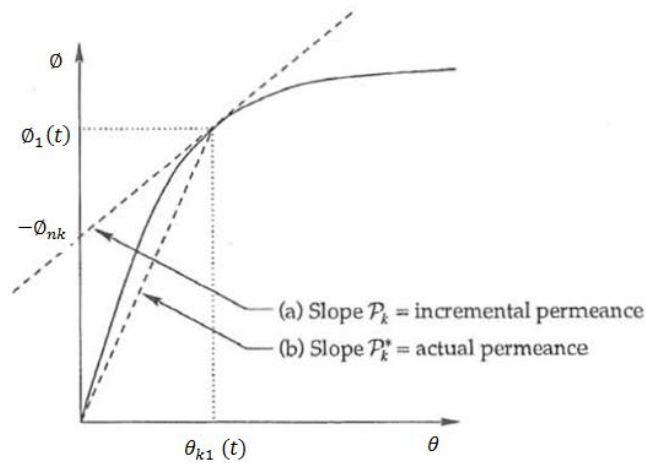


Figura 4.2 – Representação da Permeância incremental.

Como o núcleo do transformador se move em torno da região do joelho, a mudança na permeabilidade incremental é muito maior e mais repentina do que a variação na permeabilidade real [4]. A representação do fluxo em um ramo do reator na forma de vetor:

$$\tilde{\phi} = [P^*]([N]i - \tilde{\theta}') \quad (4.12)$$

Onde:

[P]: Matriz diagonal contendo as permeâncias dos ramos.

[N]: Matriz diagonal contendo os números de enrolamentos.

4.2 UMEC - Equivalente de Norton

A relação entre a corrente do enrolamento e o fluxo pode ser estendido incorporando as conexões no ramo no circuito magnético equivalente. A matriz de ligação de ramo de nó do circuito magnético é [A] e o vetor do fluxo magnético ϕ_{NO} . Em cada nó os fluxos devem somar zero:

$$[A]^T \tilde{\phi} = \tilde{\theta} \quad (4.13)$$

Aplicando no ramo:

$$[A]\tilde{\theta} = \tilde{\theta}' \quad (4.14)$$

Combinando a equação 4.12, 4.13 e 4.14:

$$[A]^T \tilde{\phi} = \tilde{\theta} = [A]^T [P][N]\tilde{i} - [A]^T [P][A]\tilde{\theta}, \quad (4.15)$$

Organizando e aplicando $\tilde{\Phi}_n = [P] \tilde{\theta}_n$ na equação 4.15:

$$\tilde{\theta} = ([A]^T [P][A])^{-1} ([A]^T [P][N]\tilde{i}), \quad (4.16)$$

Substituindo a equação 4.16 na equação 4.14:

$$\tilde{\theta} = [A]([A]^T [P][A])^{-1} [A]^T [P][N]\tilde{i}, \quad (4.17)$$

A equação 4.17 combinada com equação 4.12:

$$\tilde{\phi} = [P]([N]\tilde{i} - [A]([A]^T [P][A])^{-1} [A]^T [P][N]\tilde{i}), \quad (4.18)$$

$$\tilde{\phi} = ([I] - [P][A]([A]^T [P][A])^{-1} [A]^T) ([P][N]\tilde{i}), \quad (4.19)$$

$$\tilde{\phi} = [M][P][N]\tilde{i}, \quad (4.20)$$

Onde:

$$[M] = [I] - [P][A]([A]^T [P][A])^{-1} [A]^T, \quad (4.21)$$

A matriz $[M]$ é singular. O ramo dividi em dois grupos, um com FMM onde encontra-se o enrolamento e outro com relutância pura, então a equação 4.20 pode ser reescrita [10]:

$$\begin{bmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [M_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [P_s] & [0] \\ [0] & [P_r] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} [N_s]\check{i}_s \\ \tilde{\theta} \end{pmatrix}, \quad (4.22)$$

O fluxo referente às fontes é calculado usando a parte da equação 4.22:

$$\check{\phi}_s = [M_{ss}][P_s][N_s]\check{i}_s, \quad (4.23)$$

A tensão no enrolamento está relacionada com o fluxo magnético pela Lei de Faraday.

$$v = N \frac{d\phi}{dt}, \quad (4.24)$$

Isolando o fluxo na equação 4.24 e aplicando o método integração trapezoidal a equação fica:

$$\tilde{\phi}_s(t) = \tilde{\phi}_s(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2} [N_s]^{-1} [\check{v}_s(t) + \check{v}_s(t - \Delta t)], \quad (4.25)$$

Cominando a equação 4.25 e 4.23 temos o equivalente de Norton:

$$\tilde{i}_s(t) = [Y_{ss}]\check{v}_s(t) + \tilde{i}_{ns}, \quad (4.26)$$

Onde:

$$[Y_{ss}] = ([M_{ss}][P_s][N_s])^{-1} \frac{\Delta t}{2} [N_s]^{-1}, \quad (4.27)$$

e:

$$\tilde{i}_{ns} = ([M_{ss}][P_s][N_s])^{-1} \left(\frac{\Delta t}{2} [N_s]^{-1} \check{v}_s(t - \Delta t) + \tilde{\phi}_s(t - \Delta t) \right), \quad (4.28)$$

O calculo da matriz inversa escolhido para modelo foi utilizando a fatorização LU, a representação do calculo encontra-se no Apêndice 7.1.

A equação 4.26 representa equivalente de Norton do modelo UMEC. A equação 4.1 a 4.26 são gerais e aplicáveis a qualquer circuito equivalente magnético com um ou vários ramos. O circuito equivalente magnético unificado pode ser incluindo características magnéticas do núcleo sendo ar

ou ferro. O UMEC calcula o fluxo magnético no ramo em cada etapa de tempo e determina uma admitância equivalente que é adicionado com uma derivação entre os terminais do circuito equivalente de Norton para representar as grandezas do núcleo magnético [4].

4.3 Cálculos dos Parâmetros magnéticos:

O núcleo do reator é dividido em duas partes a que contem os enrolamentos e o jugo como na figura 4.3. Suas dimensões são:

- L_w : Comprimento do enrolamentos;
- A_w : Área do enrolamentos;
- A_y : Área do Jugo;
- L_y : Comprimento do Jugo.

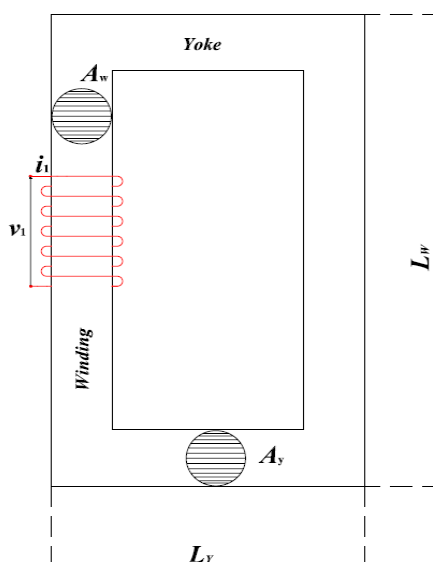


Figura 4.3 – Representação do núcleo do reator.

4.3.1 Curva $B \times H$:

No item 3.1 o indutor não linear é representada pelo método de aproximação linear por trechos na curva $\lambda \times i$. O método UMEC proposto nesse trabalho usa os paramentos da curva $B \times H$ em vez usar a curva $\lambda \times i$. Aplicando algoritmo do item 3.1 do indutor não linear pelo método de aproximação linear por trechos nos pontos da curva $B \times H$ obtemos a curva conforme Figura 4.4.

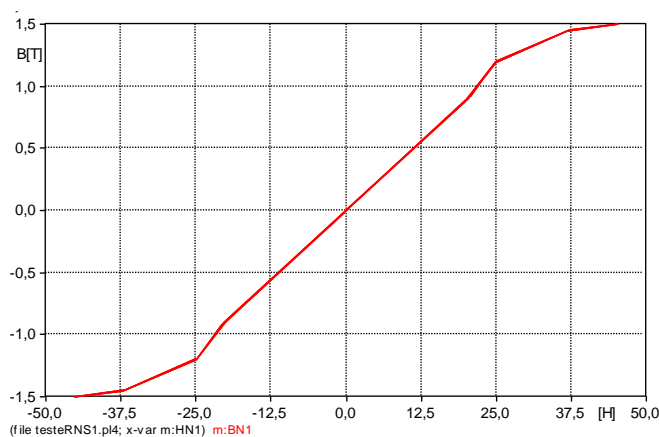


Figura 4.4 – Curva $B \times H$ pelo método de aproximação linear por trechos.

Na figura 4.5 é apresentado o algoritmo da Curva $B \times H$ pelo método de aproximação linear por trechos.

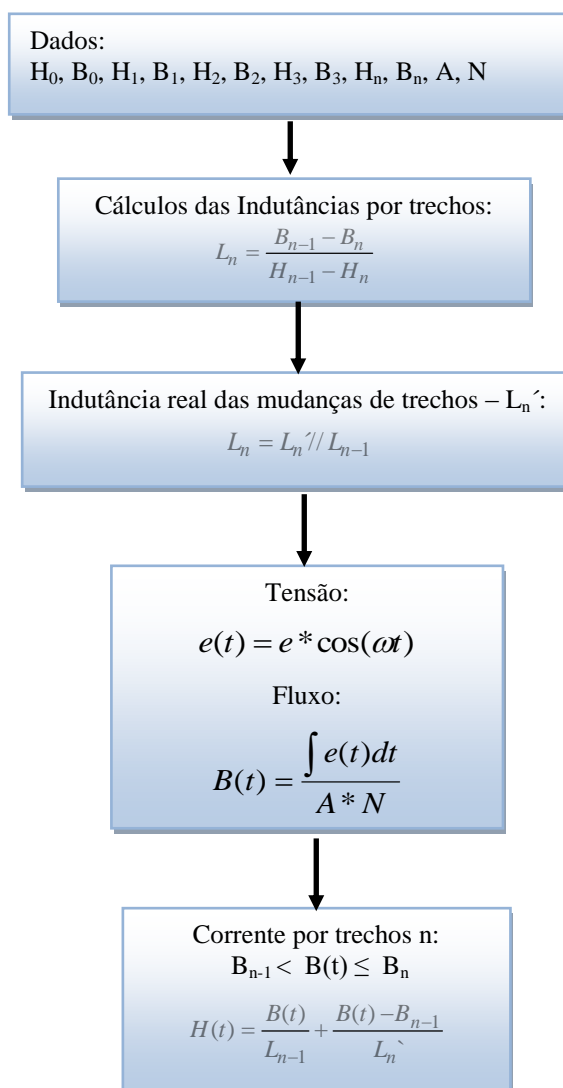


Figura 4.5 - Algoritmo Curva $B \times H$ pelo método de aproximação linear por trechos

Curva $B \times H$ com histerese:

No circuito magnético do transformador uma excitação variável no tempo faz com que o material magnético seja submetido a uma variação cíclica descrita por um laço de histerese como o mostrado na Figura 4.6. Toda vez que o material é submetido a um ciclo há um fornecimento de energia para dentro do material. Essa energia é requerida para girar os dipolos do material e é dissipada como calor no material. Assim, para um dado ciclo, as perdas por histerese correspondentes são proporcionais à área do ciclo de histerese e ao volume total de material. Como há uma perda de energia a cada ciclo, a potência das perdas por histerese é proporcional à frequência da excitação aplicada [11].

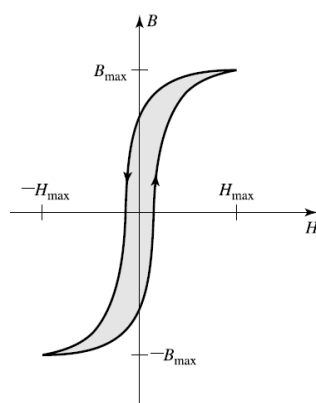


Figura 4.6 – Laço de histerese representação das perdas por histerese.

No modelo de transformador usado no ATP, capítulo 3, o efeito de saturação é representado pelo único reator não linear representado pelo componente *TYPE 98*, mas esse componente não representa o laço de histerese. Pela liberdade de criar novos modelos, a rotina na MODELS pode ser inserido o laço de histerese. O gráfico da curva $B \times H$ usando o algoritmo da Curva $B \times H$ pelo método de aproximação linear por trechos com perdas histerese é mostrado na Figura 4.7:

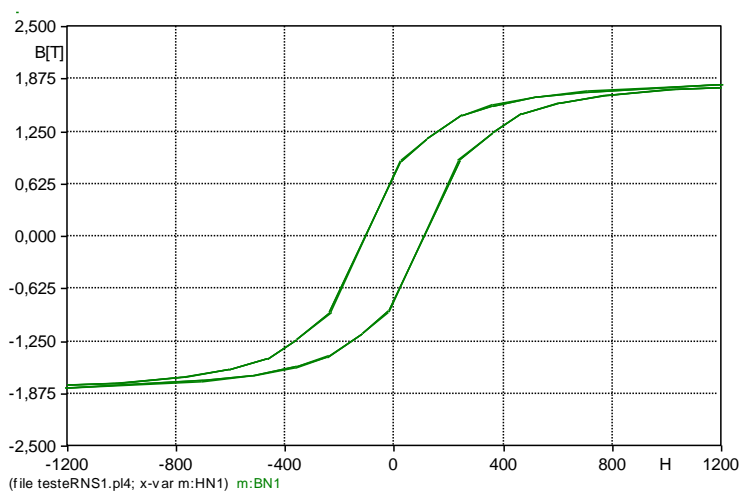


Figura 4.7 – Laço Histerese na MODELS.

Na figura 4.8 é apresentado o algoritmo da Curva $B \times H$ pelo método de aproximação linear por trechos com perdas histerese.

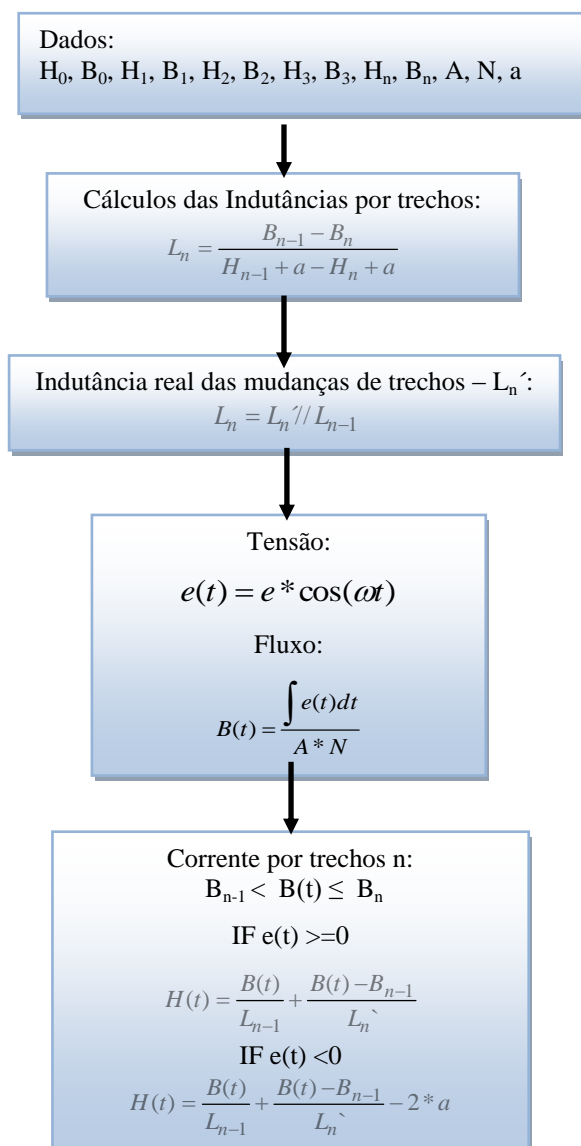


Figura 4.8 - Algoritmo Curva $B \times H$ pelo método de aproximação linear por trechos com perdas histerese.

4.3.2 Permeância no ramo:

A permeância do modelo UMEC no ramos que é calculada pela formula:

$$P = \frac{\mu * A_w}{L_w}, \quad (4.29)$$

Como o reator é não linear a permeabilidade (μ) é calculada em cada passo do tempo através da curva $B \times H$ pelo método de aproximação linear por trechos conforme colocado anteriormente.

$$\mu = \frac{B}{H}, \quad (4.30)$$

4.3.3 Permeância de dispersão:

A permeância de dispersão é calculada através indutância de dispersão:

$$P_d = \frac{L_d}{N^2}, \quad (4.31)$$

4.3.4 Permeância de sequencia zero ou retorno:

$$P_s = \frac{L_s}{N_1 * N_2}, \quad (4.32)$$

4.3.5 Fluxo no ramo:

$$\phi = B * A, \quad (4.33)$$

4.3.6 Fluxo de dispersão:

$$\phi_d = P_d(H * L + \frac{\phi}{P}), \quad (4.34)$$

4.3.7 Fluxo de sequencia zero ou retorno:

$$\phi_s = P_s(\frac{\phi_{d1}}{P_{d1}} + \frac{\phi_{d2}}{P_{d2}}), \quad (4.35)$$

4.3.8 Fluxo no yoke:

$$\phi_y = \phi - \phi_d, \quad (4.36)$$

Utilizando as equações 4.1 a 4.36 o algoritmo do modelo UMEC é representado para simular reatores e transformadores saturados. Como o UMEC representa o circuito magnético do equipamento, para cada característica, como numero de enrolamentos e núcleos, o modelo UMEC é representado por um algoritmo.

O modelo UMEC foi desenvolvido na rotina da MODELS para seguintes características:

- Reator naturalmente saturado monofásico com 1 núcleo, 1 enrolamento e 1 retorno;
- Transformador saturado monofásico com 2 núcleos e 2 enrolamentos;
- Reator naturalmente saturado trifásico com 3 núcleo, 6 enrolamentos e 2 retornos;
- Reator naturalmente saturado trifásico com 3 núcleo, 9 enrolamentos e 2 retornos.

Uns dos projetos desenvolvidos pelo LSDP foi um reator naturalmente saturado com 9 núcleos sendo constituído de três reatores naturalmente saturado, um reator de 3 núcleos, 6 enrolamentos e 2 retornos em paralelo com dois reatores com 3 núcleos, 9 enrolamentos e dois retornos. Afim de comparação de modelo foi desenvolvido o mesmo reator com a mesma constituição no modelo UMEC com rotina da MODELS.

Figura 4.9 é apresentado o algoritmo do modelo UMEC reator naturalmente Saturado.

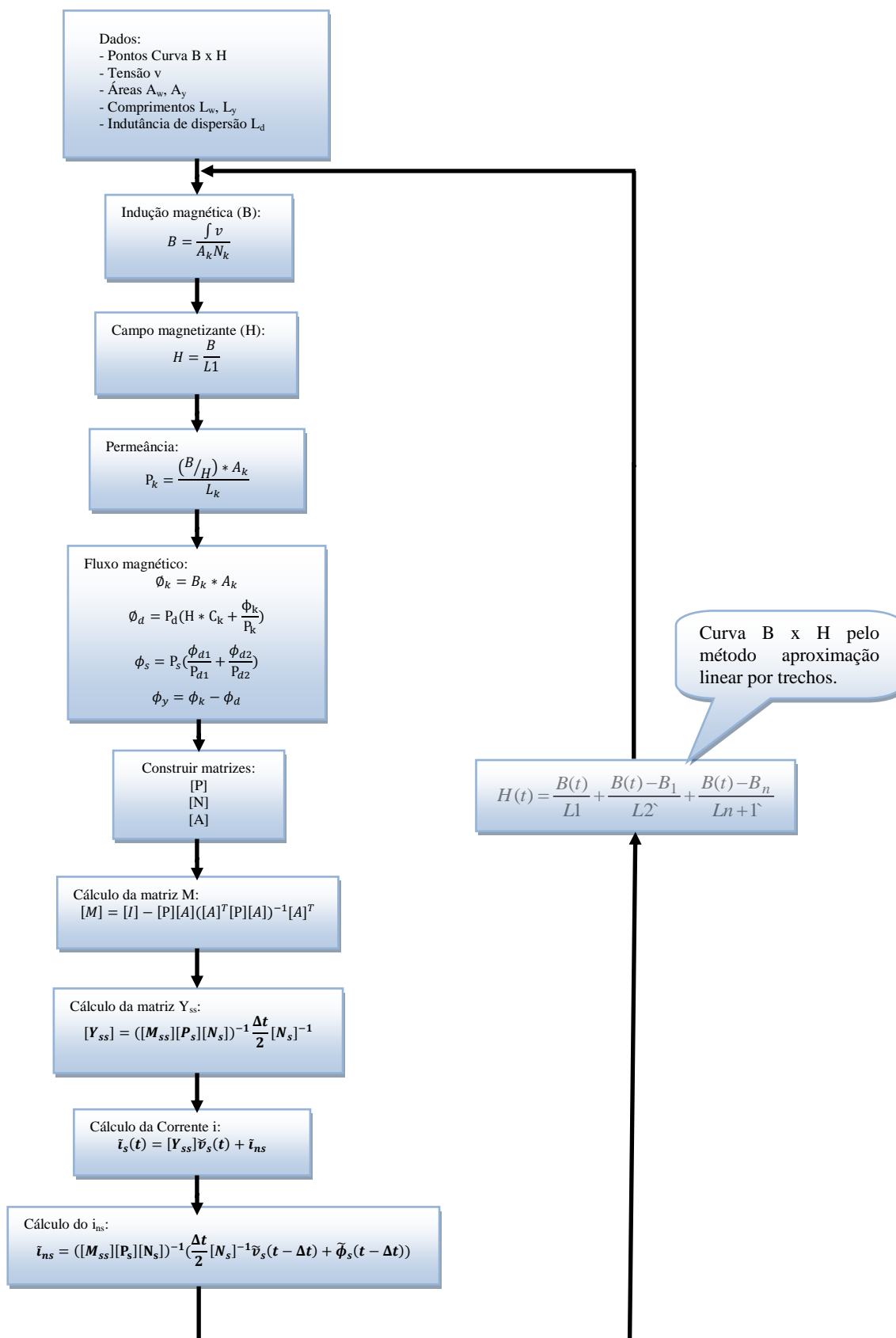


Figura 4.9 - Algoritmo modelo UMEC reator naturalmente Saturado

4.4 Reator Naturalmente Saturado Modelo UMEC monofásico

4.4.1 Reator Naturalmente Saturado com 1 núcleo, 1 enrolamento e 1 retorno

Reator Naturalmente Saturado com um núcleo, um enrolamento e um retorno é mostrado na Figura 4.10. O Circuito magnético e o modelo UMEC é representado Figura 4.11.

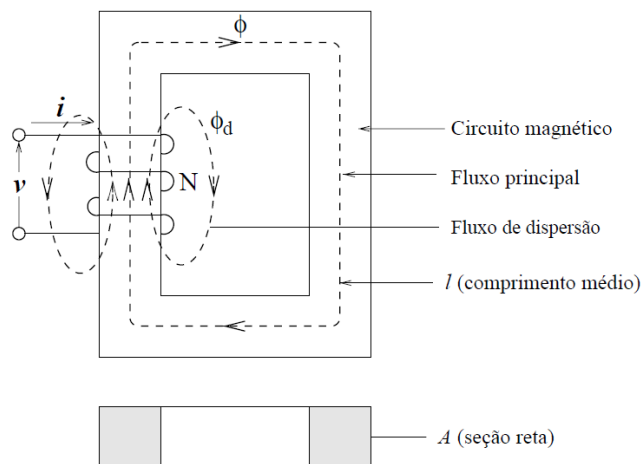


Figura 4.10 – Reator com 1 núcleo, 1 enrolamento e 1 retorno.

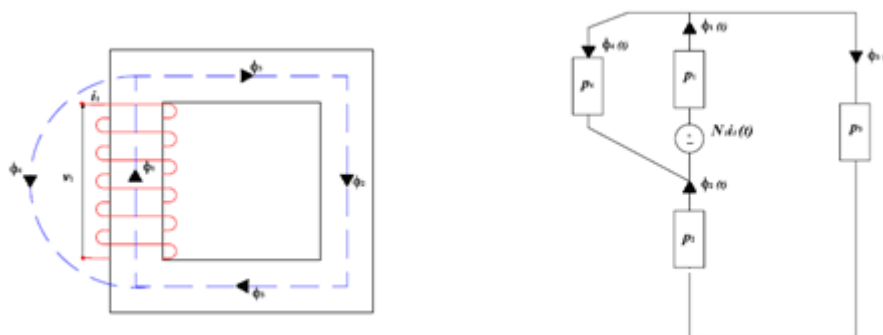


Figura 4.11 – Circuito magnético e circuito modelo UMEC do reator

Matrizes A e P:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \\ -1 & 0 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.36)$$

$$P = \begin{bmatrix} P1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P4 \end{bmatrix}, \quad (4.37)$$

A matriz M é obtida pela equação 4.21: $[M] = [I] - [P][A]([A]^T[P][A])^{-1}[A]^T$

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \\ -1 & 0 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} * \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} P1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P4 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \\ -1 & 0 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \right)^{-1} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.38)$$

O ramo é dividido em dois grupo, um com fontes de FMM e outro com relutância pura. Assim a matriz M_{ss} é:

$$M_{ss} = [m_{11}], \quad (4.39)$$

Matriz Y_{ss} é obtida pela equação 4.27:

$$[Y_{11}] = ([m_{11}] * [P1] * [N1])^{-1} * \frac{\Delta T}{2} * [N1]^{-1}, \quad (4.40)$$

Matriz i_s obtida pela equação 4.26:

$$[i_1] = [Y_{11}] * [v_1] + [ins_1], \quad (4.41)$$

Onde i_{ns} é obtida pela equação 4.28:

$$[ins_1] = ([m_{11}] * [P1] * [N1])^{-1} * \left(\frac{\Delta T}{2} * [N1]^{-1} * [v_1] + [\emptyset 1] \right), \quad (4.42)$$

Aplicando as equações no algoritmo na linguagem MODELS do ATP obtemos as simulações. Simulações e resultados do modelo UMEC para reatores com 1 núcleo, 1 enrolamento e 1 retorno será apresentado no capítulo 5.

4.4.2 Transformador Saturado com 2 núcleos e 2 enrolamentos

Adicionando mais um enrolamento no reator apresentado no item à cima obtemos um modelo de transformador Saturado. O Circuito magnético e o modelo UMEC do transformador é representado Figura 4.12.

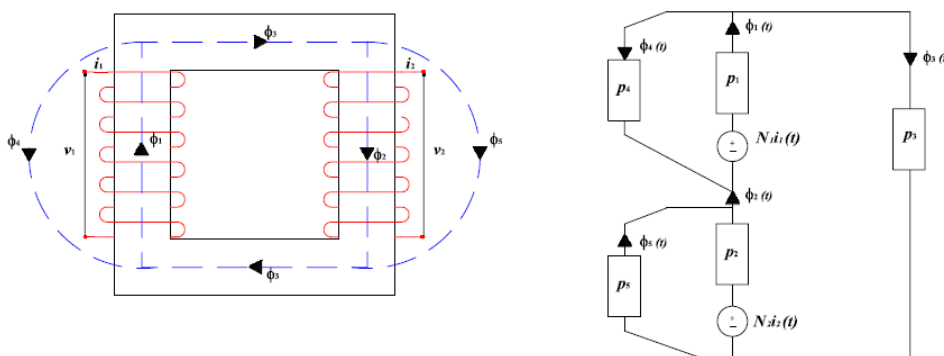


Figura 4.12 – Circuito magnético e circuito modelo UMEC do transformador.

Matrizes A, P, M, M_{ss} , Y_{ss} e i:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \\ -1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad (4.43)$$

$$P = \begin{bmatrix} P1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P5 \end{bmatrix}, \quad (4.44)$$

$$M = \begin{bmatrix} m11 & m12 & m13 & m14 & m15 \\ m21 & m22 & m23 & m24 & m25 \\ m31 & m32 & m33 & m34 & m35 \\ m41 & m42 & m43 & m44 & m45 \\ m51 & m52 & m53 & m54 & m55 \end{bmatrix}, \quad (4.45)$$

$$M_{ss} = \begin{bmatrix} m11 & m12 \\ m21 & m22 \end{bmatrix}, \quad (4.46)$$

$$Y_{ss} = \begin{bmatrix} Y11 & Y12 \\ Y21 & Y22 \end{bmatrix}, \quad (4.47)$$

$$\begin{bmatrix} i1 \\ i2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y11 & Y12 \\ Y21 & Y22 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v1 \\ v2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} ins1 \\ ins2 \end{bmatrix}, \quad (4.48)$$

$$\begin{bmatrix} ins1 \\ ins2 \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} m11 & m12 \\ m21 & m22 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} P1 & 0 \\ 0 & P2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} N1 & 0 \\ 0 & N2 \end{bmatrix} \right)^{-1} * \left(\frac{\Delta T}{2} * \begin{bmatrix} N1 & 0 \\ 0 & N2 \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} v1 \\ v2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \emptyset 1 \\ \emptyset 2 \end{bmatrix} \right), \quad (4.49)$$

Indutâncias de circuito aberto e curto circuito no UMEC:

No modelo do transformador o circuito equivalente de *Steinmetz* obtém as indutâncias do circuito aberto e curto circuito experimentalmente. O UMEC pode ser aplicado para derivar indutâncias de circuito aberto e curto, tendo em conta tanto o núcleo e os caminhos de fluxo dispersão. Indutâncias estão presentes em qualquer permeância P no ramo real ou relutância R dependendo de qual representação produz a derivação simples.

Circuito Aberto:

Figura 4.13 mostra modelo UMEC com enrolamento do secundário em aberto e seu circuito magnético simplificado.

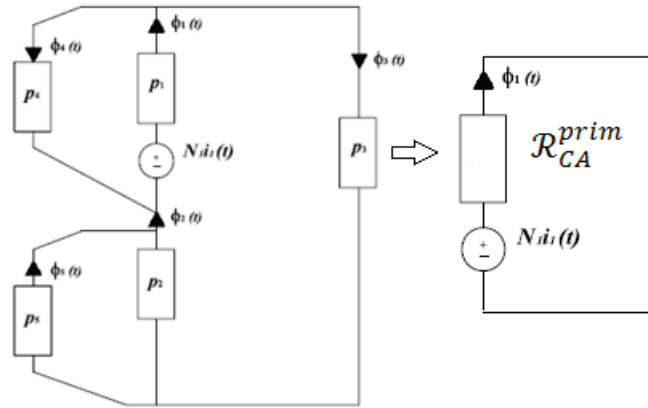


Figura 4.13 – Circuito magnético e circuito simplificado em aberto

$$\mathcal{R}_{CA}^{prim} = \frac{(\mathcal{R}_1\mathcal{R}_4 + \mathcal{R}_1\mathcal{R}_3 + \mathcal{R}_3\mathcal{R}_4)(\mathcal{R}_2 + \mathcal{R}_5) + (\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_4)\mathcal{R}_2\mathcal{R}_5}{(\mathcal{R}_3 + \mathcal{R}_4)(\mathcal{R}_2 + \mathcal{R}_5) + \mathcal{R}_2\mathcal{R}_5}, \quad (4.50)$$

Similarmente, se o enrolamento primário é aberto e o secundário é energizado o UMEC pode ser reduzido conforme figura 4.8.[10]

$$\mathcal{R}_{CA}^{sec} = \frac{(\mathcal{R}_2\mathcal{R}_5 + \mathcal{R}_2\mathcal{R}_3 + \mathcal{R}_3\mathcal{R}_5)(\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_4) + (\mathcal{R}_2 + \mathcal{R}_5)\mathcal{R}_1\mathcal{R}_4}{(\mathcal{R}_3 + \mathcal{R}_5)(\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_4) + \mathcal{R}_1\mathcal{R}_4}, \quad (4.51)$$

As indutâncias do primário e secundário do circuito aberto são:

$$L_{CA}^{prim} = \frac{N_1^2}{\mathcal{R}_{CA}^{prim}}, \quad (4.52)$$

$$L_{CA}^{sec} = \frac{N_2^2}{\mathcal{R}_{CA}^{sec}}, \quad (4.53)$$

Circuito em curto-circuito:

Figura 4.14 mostra modelo UMEC com enrolamento do secundário em curto e seu circuito magnético simplificado [4].

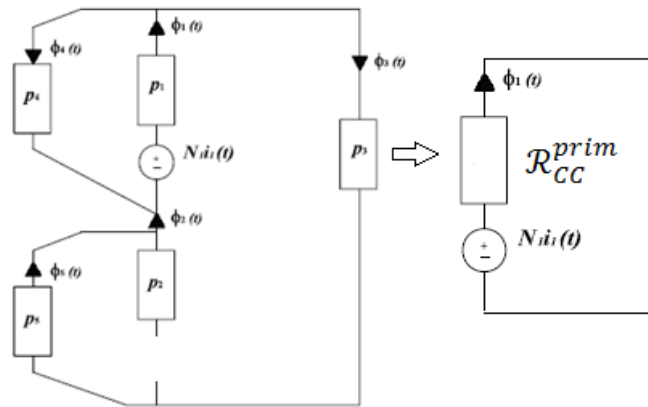


Figura 4.14 – Circuito magnético e circuito simplificado em curto circuito

$$\mathcal{R}_{CC}^{prim} = \frac{\mathcal{R}_1(\mathcal{R}_3 + \mathcal{R}_4 + \mathcal{R}_5) + \mathcal{R}_4(\mathcal{R}_3 + \mathcal{R}_5)}{(\mathcal{R}_3 + \mathcal{R}_4 + \mathcal{R}_5)}, \quad (4.54)$$

Similar, quando o enrolamento primário é curto circuitado o UMEC pode ser reduzido.

$$\mathcal{R}_{CC}^{sec} = \frac{\mathcal{R}_2(\mathcal{R}_3 + \mathcal{R}_4 + \mathcal{R}_5) + \mathcal{R}_5(\mathcal{R}_3 + \mathcal{R}_4)}{(\mathcal{R}_3 + \mathcal{R}_4 + \mathcal{R}_5)}, \quad (4.55)$$

As indutâncias do primário e secundário do circuito em curto são:

$$L_{CC}^{prim} = \frac{N_1^2}{\mathcal{R}_{CC}^{prim}}, \quad (4.56)$$

$$L_{CC}^{sec} = \frac{N_2^2}{\mathcal{R}_{CC}^{sec}}, \quad (4.57)$$

Aplicando as equações no algoritmo na linguagem MODELS do ATP obtemos as simulações. Simulações e resultados do modelo UMEC para transformador saturado monofásico com 2 núcleos, 2 enrolamentos e 2 retornos será apresentado no capítulo 5.

4.5 Reator Naturalmente Saturado Modelo UMEC Trifásico

4.5.1 Reator Naturalmente Saturado Trifásico com 3 núcleos, 6 enrolamentos e 2 retornos

O Circuito magnético do reator trifásico com 6 enrolamentos é representado figura 4.15, e o o modelo UMEC na figura 4.16.

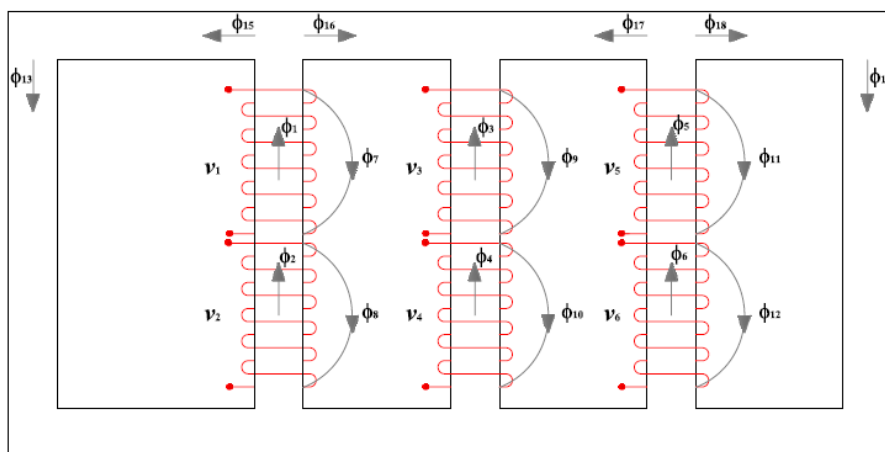


Figura 4.15 – Circuito magnético do reator trifásico de 6 enrolamentos

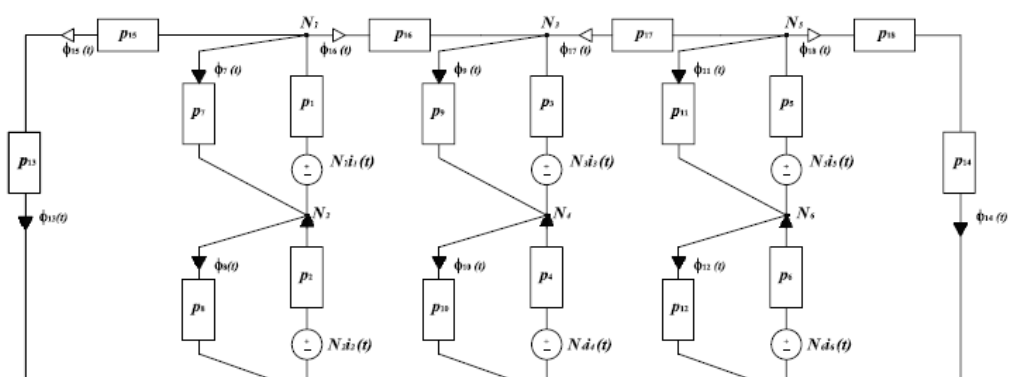


Figura 4.16 – Modelo UIMEC do reator trifásico de 6 enrolamentos

A Matriz A na Figura 4.17, Matriz P na Figura 4.18, Matriz M_{ss} na Figura 4.19, Matriz Y_{ss} na figura 4.20 e i na equação 4.58:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Figura 4.17 – Matriz A reator trifásico de 6 enrolamentos

$$P = \begin{bmatrix} P1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P11 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P13 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P14 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P15 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P16 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P17 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P18 \end{bmatrix}$$

Figura 4.18 – Matriz P reator trifásico de 6 enrolamentos

$$M_{ss} = \begin{bmatrix} m11 & m12 & m13 & m14 & m15 & m16 \\ m21 & m22 & m23 & m24 & m25 & m26 \\ m31 & m32 & m33 & m34 & m35 & m36 \\ m41 & m42 & m43 & m44 & m45 & m46 \\ m51 & m52 & m53 & m54 & m55 & m56 \\ m61 & m62 & m63 & m64 & m65 & m66 \end{bmatrix}$$

Figura 4.19 – Matriz M_{ss} do reator trifásico de 6 enrolamentos

$$Y_{ss} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{14} & y_{15} & y_{16} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & y_{24} & y_{25} & y_{26} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} & y_{34} & y_{35} & y_{36} \\ y_{41} & y_{42} & y_{43} & y_{44} & y_{45} & y_{46} \\ y_{51} & y_{52} & y_{53} & y_{54} & y_{55} & y_{56} \\ y_{61} & y_{62} & y_{63} & y_{64} & y_{65} & y_{66} \end{bmatrix}$$

Figura 4.20 – Matriz Y_{ss} do reator trifásico de 6 enrolamentos

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \\ i_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{14} & y_{15} & y_{16} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & y_{24} & y_{25} & y_{26} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} & y_{34} & y_{35} & y_{36} \\ y_{41} & y_{42} & y_{43} & y_{44} & y_{45} & y_{46} \\ y_{51} & y_{52} & y_{53} & y_{54} & y_{55} & y_{56} \\ y_{61} & y_{62} & y_{63} & y_{64} & y_{65} & y_{66} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} ins_1 \\ ins_2 \\ ins_3 \\ ins_4 \\ ins_5 \\ ins_6 \end{bmatrix}, \quad (4.58)$$

$$\begin{bmatrix} ins_1 \\ ins_2 \\ ins_3 \\ ins_4 \\ ins_5 \\ ins_6 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} & m_{15} & m_{16} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} & m_{25} & m_{26} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} & m_{35} & m_{36} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} & m_{45} & m_{46} \\ m_{51} & m_{52} & m_{53} & m_{54} & m_{55} & m_{56} \\ m_{61} & m_{62} & m_{63} & m_{64} & m_{65} & m_{66} \end{pmatrix} * \begin{bmatrix} P_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_6 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & N_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_6 \end{bmatrix}^{-1} * \left(\frac{\Delta T}{2} * \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & N_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_6 \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \emptyset_1 \\ \emptyset_2 \\ \emptyset_3 \\ \emptyset_4 \\ \emptyset_5 \\ \emptyset_6 \end{bmatrix} \right), \quad (4.59)$$

Aplicando as equações no algoritmo na linguagem MODELS do ATP obtemos as simulações. Simulações e resultados do modelo UMEC para reatores saturados trifásico com 3 núcleos, 6 enrolamentos e 2 retornos será apresentado na seção 5.2.1.

4.5.2 Reator Naturalmente Saturado Trifásico de 3 núcleos, 9 enrolamentos e 2 retornos

O circuito magnético do reator trifásico com 9 enrolamentos é representado na Figura 4.21, e o o o modelo UMEC na Figura 4.22.

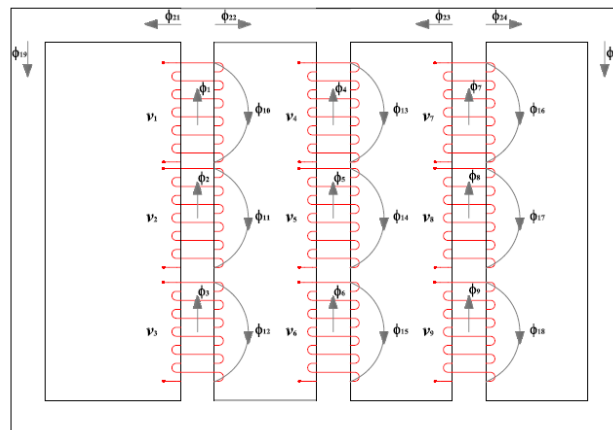


Figura 4.21 – Circuito magnético do reator trifásico de 9 enrolamentos

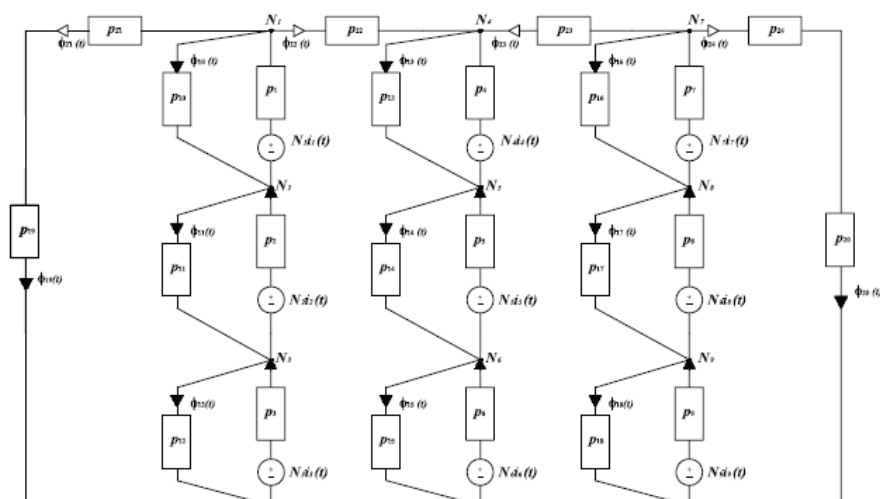


Figura 4.22 – Modelo UIMEC do reator trifásico de 9 enrolamentos

Matriz A na Figura 4.23, Matriz P na Figura 4.24, Matriz M_{ss} na Figura 4.25, Matriz Y_{ss} na Figura 4.26 e a Matriz i e i_{ns} na equação 4.60 e 4.61:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Figura 4.23 – Matriz A reator trifásico de 9 enrolamentos

$$\begin{bmatrix} i1 \\ i2 \\ i3 \\ i4 \\ i5 \\ i6 \\ i7 \\ i8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y11 & y12 & y13 & y14 & y15 & y16 & y17 & y18 & y19 \\ y21 & y22 & y23 & y24 & y25 & y26 & y27 & y28 & y29 \\ y31 & y32 & y33 & y34 & y35 & y36 & y37 & y38 & y39 \\ y41 & y42 & y43 & y44 & y45 & y46 & y47 & y48 & y49 \\ y51 & y52 & y53 & y54 & y55 & y56 & y57 & y58 & y59 \\ y61 & y62 & y63 & y64 & y65 & y66 & y67 & y68 & y69 \\ y71 & y72 & y73 & y74 & y75 & y76 & y77 & y78 & y79 \\ y81 & y82 & y83 & y84 & y85 & y86 & y87 & y88 & y89 \\ y91 & y92 & y93 & y94 & y95 & y96 & y97 & y98 & y99 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v1 \\ v2 \\ v3 \\ v4 \\ v5 \\ v6 \\ v7 \\ v8 \\ v9 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} ins1 \\ ins2 \\ ins3 \\ ins4 \\ ins5 \\ ins6 \\ ins7 \\ ins8 \\ ins9 \end{bmatrix}, \quad (4.60)$$

$$\begin{bmatrix} ins1 \\ ins2 \\ ins3 \\ ins4 \\ ins5 \\ ins6 \\ ins7 \\ ins8 \\ ins9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m11 & m12 & m13 & m14 & m15 & m16 & m17 & m18 & m19 \\ m21 & m22 & m23 & m24 & m25 & m26 & m27 & m28 & m29 \\ m31 & m32 & m33 & m34 & m35 & m36 & m37 & m38 & m39 \\ m41 & m42 & m43 & m44 & m45 & m46 & m47 & m48 & m49 \\ m51 & m52 & m53 & m54 & m55 & m56 & m57 & m58 & m59 \\ m61 & m62 & m63 & m64 & m65 & m66 & m67 & m68 & m69 \\ m71 & m72 & m73 & m74 & m75 & m76 & m77 & m78 & m79 \\ m81 & m82 & m83 & m84 & m85 & m86 & m87 & m88 & m89 \\ m91 & m92 & m93 & m94 & m95 & m96 & m97 & m98 & m99 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} P1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P9 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} N1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & N5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N9 \end{bmatrix}^{-1} * \left(\frac{\Delta T}{2} * \begin{bmatrix} N1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & N5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N9 \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} v1 \\ v2 \\ v3 \\ v4 \\ v5 \\ v6 \\ v7 \\ v8 \\ v9 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \emptyset1 \\ \emptyset2 \\ \emptyset3 \\ \emptyset4 \\ \emptyset5 \\ \emptyset6 \\ \emptyset7 \\ \emptyset8 \\ \emptyset9 \end{bmatrix} \right), \quad (4.61)$$

Aplicando as equações no algoritmo na linguagem MODELS do ATP obtemos as simulações. Simulações e resultados do modelo UMEC para reatores saturados trifásico de 3 núcleos, 9 enrolamentos e 2 retornos será apresentado no capítulo (5).

CAPÍTULO 5

SIMULAÇÕES DO MODELO UMEC DE REATORES NATURALMENTE SATURADO NA MODELS DO ATP

5.1 – Modelo UMEC Monofásico na MODELS

5.1.1 – Reator Naturalmente Saturado com 1 núcleo, 1 enrolamento e 1 retorno – RNS1

O RNS 1 é formado conforme Figura 4.11 no Capítulo 4. Pontos da Curva B x H usado no RNS1 estão na Tabela 5.1:

Tabela 5.1 – Curva B x H – 9 trechos

B (T)	H(A.m/e)
0,4	11,937
0,9	20,292
1,2	24,987
1,45	37,242
1,58	58,887
1,68	119,366
1,74	226,796
1,81	612,747
1,86	1193,662
1,97	10000

Os dados de entrada do RNS1 estão na Tabela 5.2:

Tabela 5.2 – Dados entrada RNS1 monofásico

DADOS ENTRADA	
Aw	0,454 (m ²)
Lw	3,59 (m)
Ay	0,454 (m ²)
Ly	2,66 (m)
Ar	0,454 (m ²)
Lr	3,59 (m)
N	65
Ld	0,12358 (mH)
V	22 KV

Circuito do RNS1 no na MODELS do ATP está representado na Figura 5.1, e sua caixa de dados na Figura 5.2.

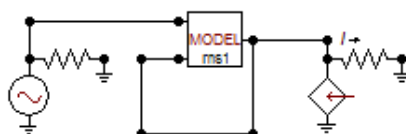


Figura 5.1 – Circuito do RNS1 na MODELS no ATP

MODEL: RNS1

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
Aw		0.454
Ay		0.454
Ar		0.454
N		65
Lw		3.59
Ly		2.66
Lr		3.59
Ld1		0.00012358125

NODE	PHASE	NAME
v1	1	XX0001
v2	1	XX0002
i1	1	XX0002

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

Models Library

Mdel: RNS1 Edit Use As: RNS1 Record

Hide Protect

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 5.2 – Dados de entrada da MODELS no ATP

A curva $B \times H$ contida na Figura 5.3 e corrente do reator saturado na Figura 5.4.

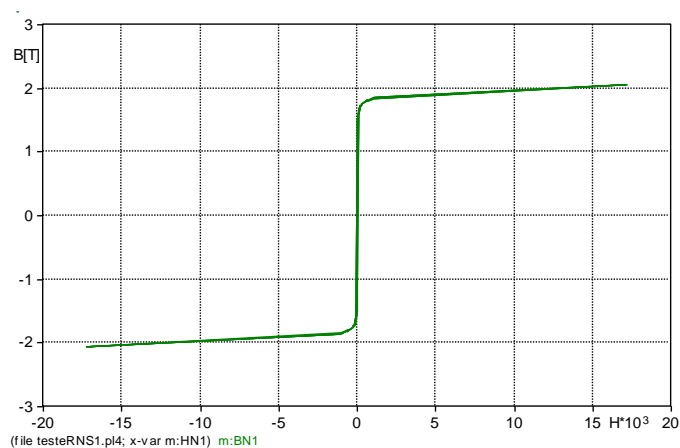


Figura 5.3 – Curva $B \times H$ na MODELS

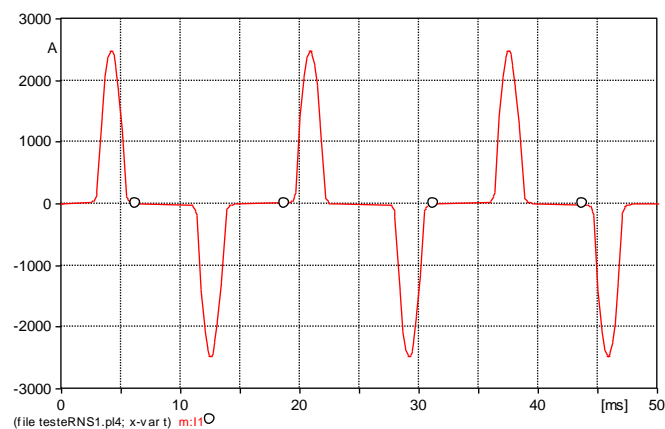


Figura 5.4 – Corrente no reator saturado monofásico modelo UMEC na MODELS

A. Comparação com ATP com elemento TYPE 98: Sem Perdas de Resistência e Indutância de dispersão.

Conforme escrito no capítulo 2 o elemento TYPE 98 é um indutor não linear representando somente a curva $\lambda \times i$. O circuito do elemento no ATP está na Figura 5.5.

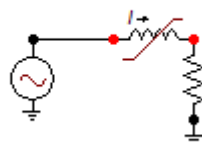


Figura 5.5 – Circuito Indutor não linear no ATP.

As simulações das correntes do circuito no ATP da Figura 5.5 e do circuito da MODELS na Figura 5.1 estão representados na Figura 5.6.

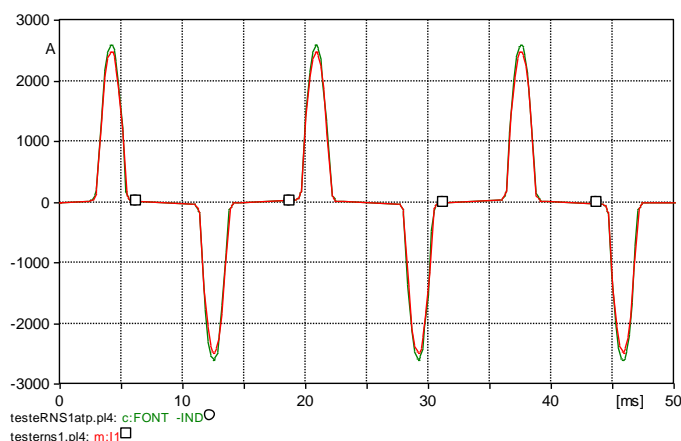


Figura 5.6 – Corrente no reator saturado na MODELS (\square) e corrente no reator saturado no Type 98 do ATP (\circ).

Conforme Figura 5.6 a uma pequena diferença nas correntes de saturação na MODELS e do *type 98* do ATP é devido na representação da MODELS o reator saturado contém elementos que representam as perdas de dispersão o não acontece no componente do ATP que é representação somente da curva $\lambda \times i$.

B. Comparação com ATP com elemento TYPE 98: Com Perdas de Resistência e Indutância de dispersão.

Dados referentes a perdas de dispersão estão na Tabela 5.3 e os dados da Curva $\lambda \times i$ na Tabela 5.4.

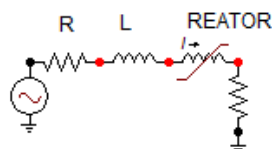
Tabela 5.3 – Dados das Perdas de dispersão

DADOS PERDAS	
R	0,17 Ω
L	0,12358 mH

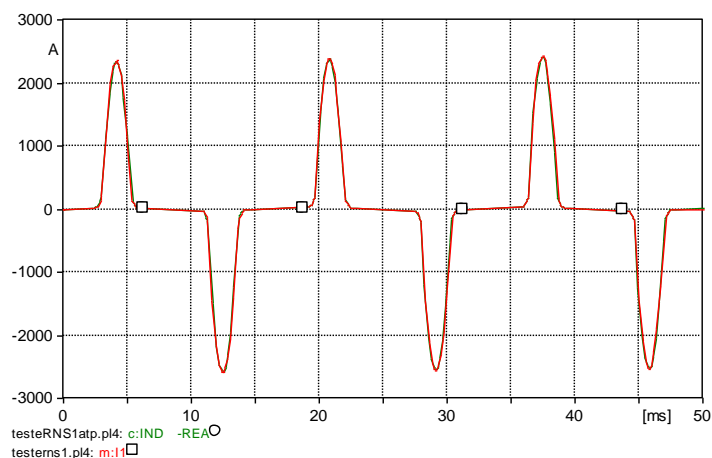
Tabela 5.4 – Dados da Curva $\lambda \times i$

Imag	λ
1,8071	11,3318
3,0719	25,4966
3,7826	33,9955
5,6379	41,0779
8,9146	44,7608
18,0702	47,5937
34,3334	49,2935
92,7605	51,2766
180,7021	52,6931
1513,8462	55,8093

O circuito do componente TYPE 98 do ATP incluindo as perdas de Resistência e Indutância está na Figura 5.7.

**Figura 5.7 – Circuito indutor não linear no ATP com perdas R, L.**

As simulações das correntes do circuito no ATP da Figura 5.7 e do circuito da MODELS na Figura 5.1 estão representados na Figura 5.8.

**Figura 5.8 – Corrente no reator saturado na MODELS (□) e corrente no reator saturado no Type 98 do ATP (○).**

Na Figura 5.8 mostra que os resultados são próximos e satisfatórios, pois o modelo da MODELS já tem as perdas de resistência e indutância de dispersão incluídas.

5.1.2 – Reator Naturalmente Saturado monofásico com 2 núcleos e 2 enrolamentos – RNS2

O RNS2 é formado como na Figura 5.9.

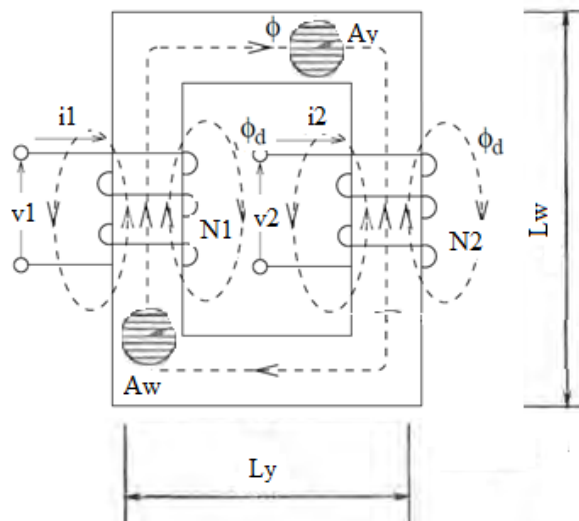


Figura 5.9 – Dimensões do RNS2

Os pontos da Curva B x H são os mesmos utilizados no RNS1 da Tabela 5.1. Os dados do RNS estão na Tabela 5.5:

Tabela 5.5 – Dados entrada RNS2 monofásico

DADOS ENTRADA	
Aw	0,454 (m ²)
Lw	3,59 (m)
Ay	0,454 (m ²)
Ly	2,66 (m)
N1	65
N2	450
Ld1	0,247167 (mH)
Ld2	11,865 (mH)
V1	16 KV
V2	110 KV

Circuito do RNS2 na MODELS do ATP está representado na Figura 5.10, e sua caixa de dados na Figura 5.11.

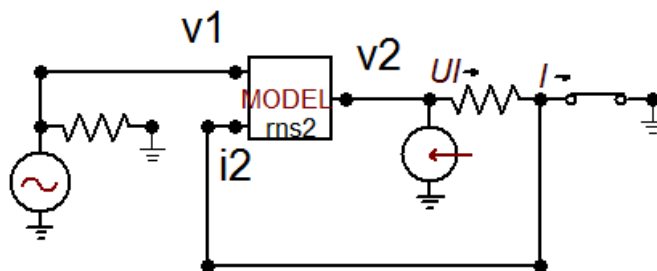


Figura 5.10 – Circuito do RNS2 na MODELS no ATP

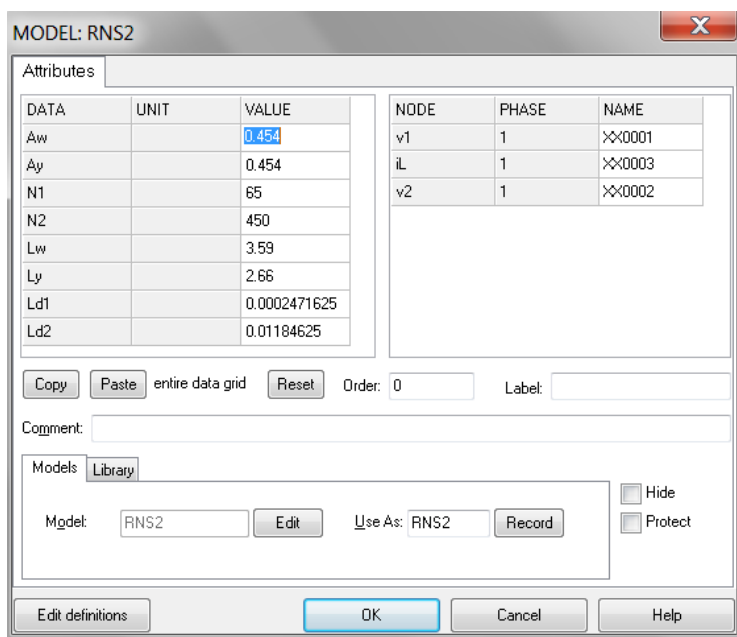


Figura 5.11 – Dados de entrada da MODELS no ATP

A curva B x H representada na MODELS está na Figura 5.12.

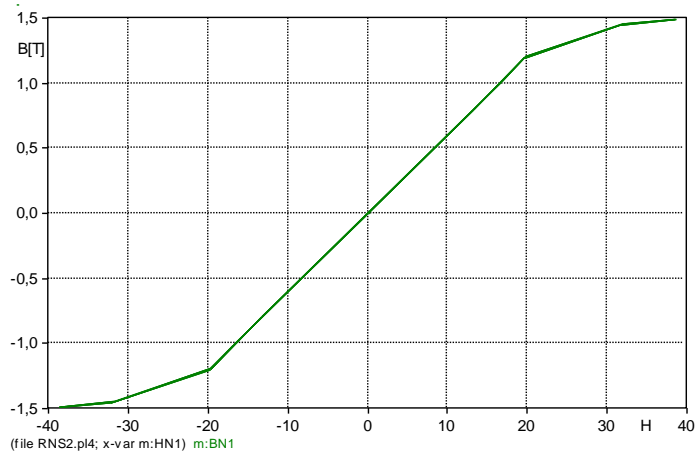


Figura 5.12 – Curva B x H na MODELS

O fluxo magnético do modelo RNS2 está representado na Figura 5.13.

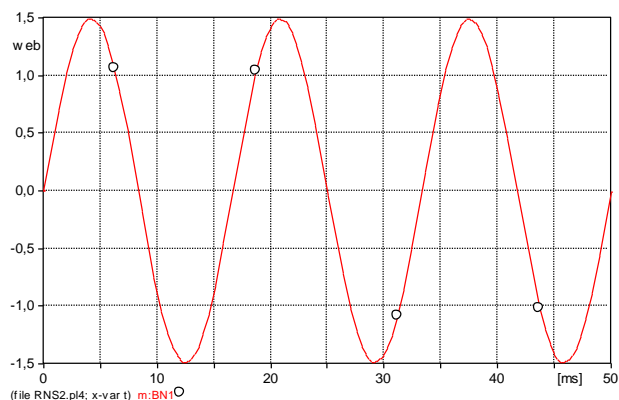


Figura 5.13 – Fluxo magnético do transformador

A forma da tensão no primário e da tensão no Secundário do RN2 está representada na Figura 5.14.

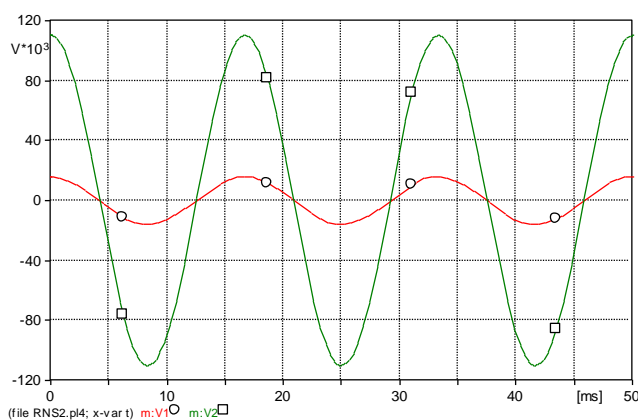


Figura 5.14 – Tensão no primário (○) e tensão no secundário (□) do transformador

O RNS2 colocado na Figura 5.15, em um sistema de teste, submetido a ensaio vazio, ensaio em curto circuito em 10% da tensão nominal e ensaio em plena carga nominal. A Tabela 5.6 lista os parâmetros do circuito elétrico do sistema de teste para os três cenários. No passo de tempo 1e-5 segundos aplicado em cada caso.

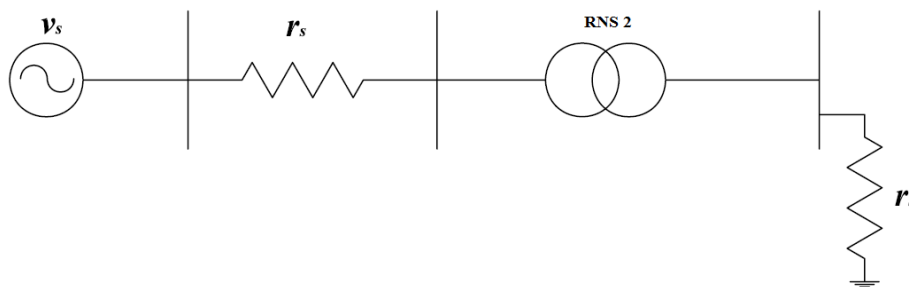


Figura 5.15 – Transformador monofásico em sistema teste

Tabela 5.6 – Parâmetros do sistema teste do transformador monofásico

TESTE	V1 (KV)	Rs (Ω)	RL (Ω)
Vazio	16	0,107	1 e+6
Curto circuito	1,6	8 e-3	7,5 e-3
Plena Carga	16	8 e-3	64,5

Teste em vazio:

A forma de onda das correntes no primário e no secundário estão na Figura 5.16.

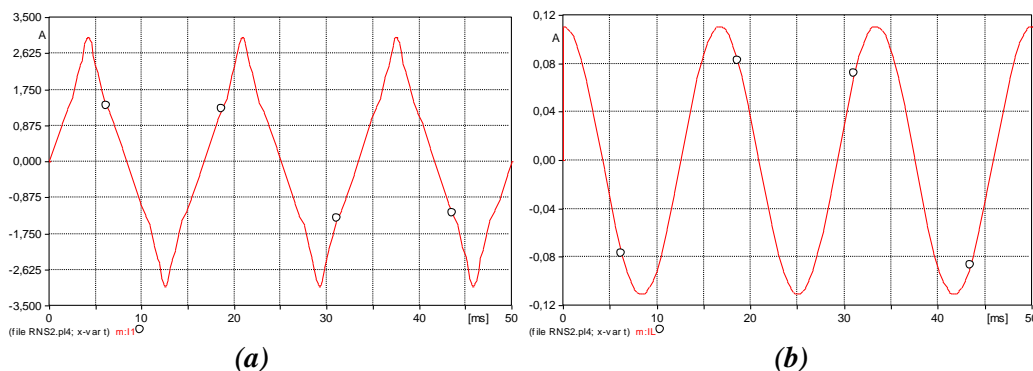


Figura 5.16 – Corrente no primário (a) e Corrente no secundário (b) teste em vazio.

Teste em Curto Circuito:

A forma de onda das correntes no primário e no secundário estão na Figura 5.17.

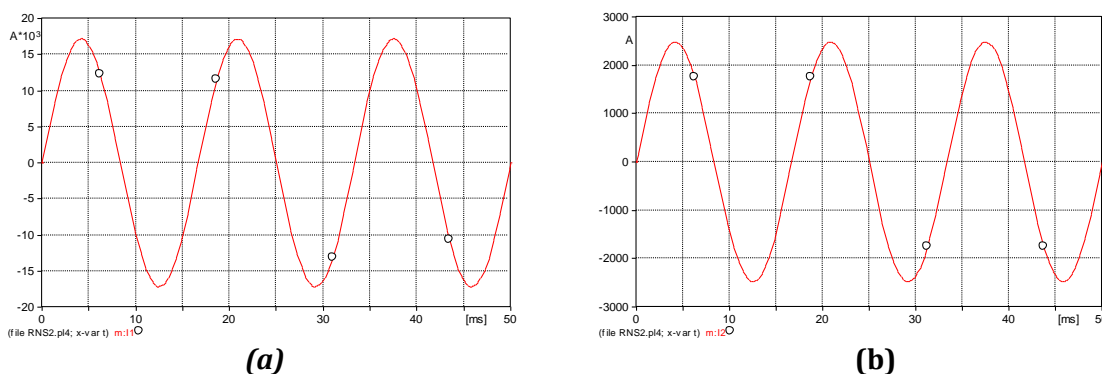


Figura 5.17 – Corrente no primário (a) e Corrente no secundário (b) teste em curto.

Teste em Plena Carga:

A forma de onda das correntes no primário e no secundário estão na Figura 5.18.

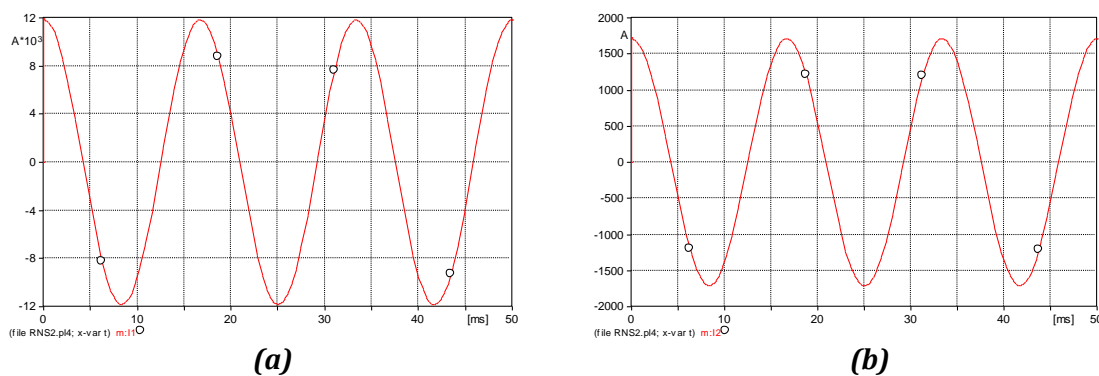


Figura 5.18 – Corrente no primário (a) e Corrente no secundário (b) teste em plena carga.

A. Comparação com ATP com elemento TRANSFORMADOR SATURÁVEL MONOFÁSICO:

No capítulo 3 foi mostrado que o modelo matemático usado no ATP para reatores e transformadores saturados é o modelo *Steinmetz* e o modelo utilizado nessa dissertação na rotina da MODELS é modelo UMEC. A Figura 5.19 representa o circuito magnético (a) modelo ATP e (c) modelo UMEC e o circuito elétrico (b) modelo ATP e (d) modelo UMEC.

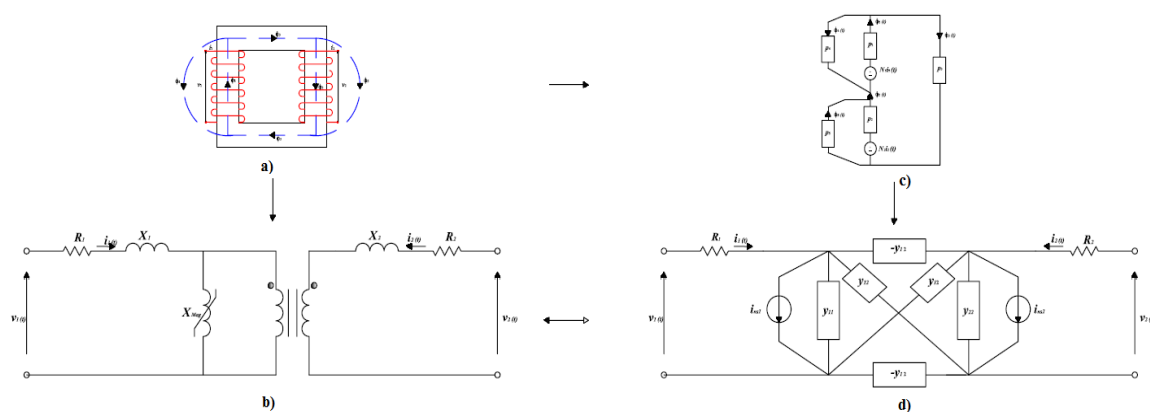


Figura 5.19 – Circuito magnético e elétrico do ATP (a) (b) e UMEC (c) (d) .

O circuito representando o transformador saturável monofásico no ATP está mostrado na Figura 5.20.

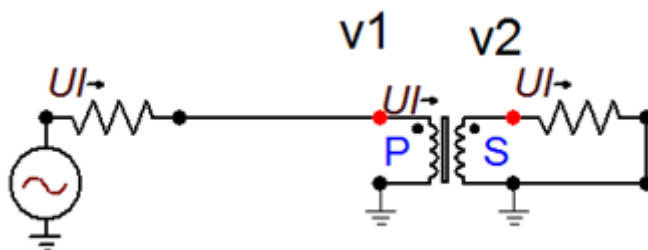


Figura 5.20 – Circuito do transformador saturável no ATP.

Os pontos da curva $\lambda \times i$ está contido na Tabela 5.7 e os dados do transformador do ATP na Figura 5.21:

Tabela 5.7 – Dados da Curva $\lambda \times i$

Imag	λ
0,7814	11,3318
1,3283	25,4966
1,6357	33,9955
2,4379	41,0779
3,8548	44,7608
7,8139	47,5937
14,8464	49,2935
40,1114	51,2766
78,1390	52,6931
654,6154	55,8093

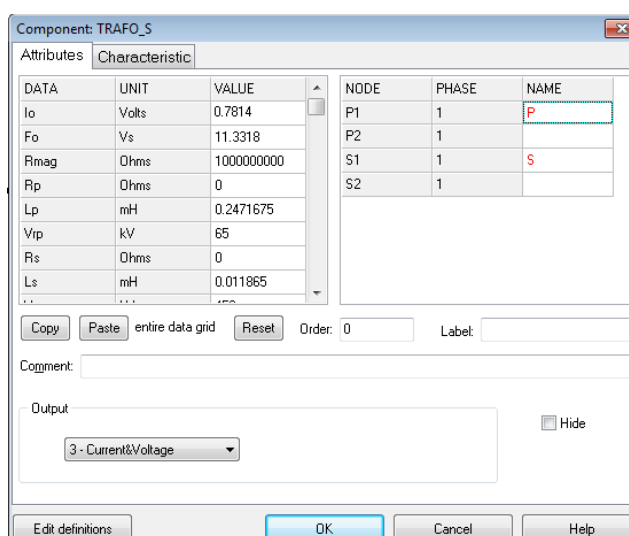


Figura 5.21 – Caixa de dados do transformador saturável no ATP.

Teste em Vazio:

A comparação das formas de ondas das correntes no primário e no secundário no modelo do ATP e no modelo da MODELS estão representados na Figura 5.22.

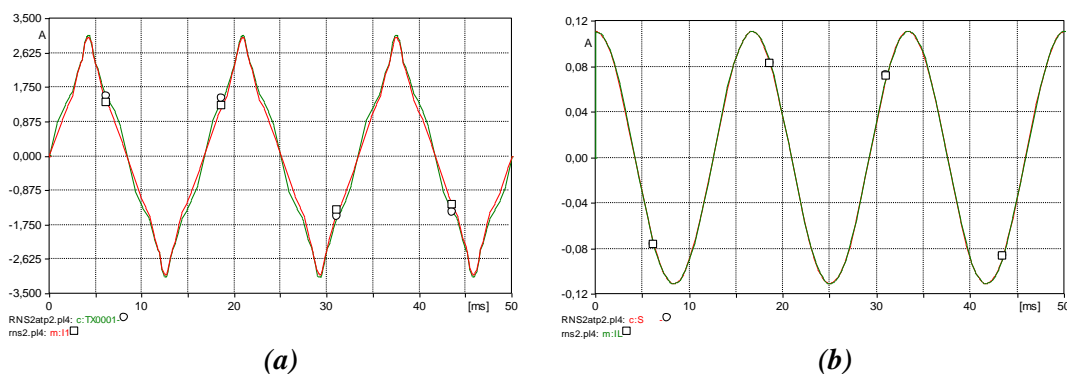


Figura 5.22 – Correntes no primário MODELS (\square) e ATP (\circ)(a) e Corrente no secundário MODELS (\square) e ATP (\circ)(b) teste em vazio

Teste em Curto Circuito:

A comparação das formas de ondas das correntes no primário e no secundário do modelo no ATP e do modelo na MODELS estão representados na Figura 5.23.

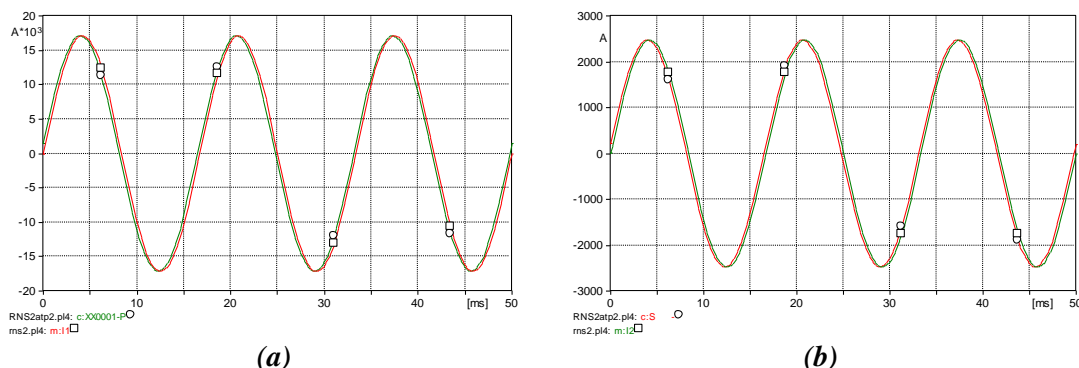


Figura 5.23 – Correntes no primário MODELS (□) e ATP (○)(a) e Correntes no secundário MODELS (□) e ATP (○)(b) teste em curto circuito.

Teste em Plena Carga:

A comparação das formas de ondas das correntes no primário e do secundário do modelo no ATP e do modelo na MODELS estão representados na Figura 5.24.

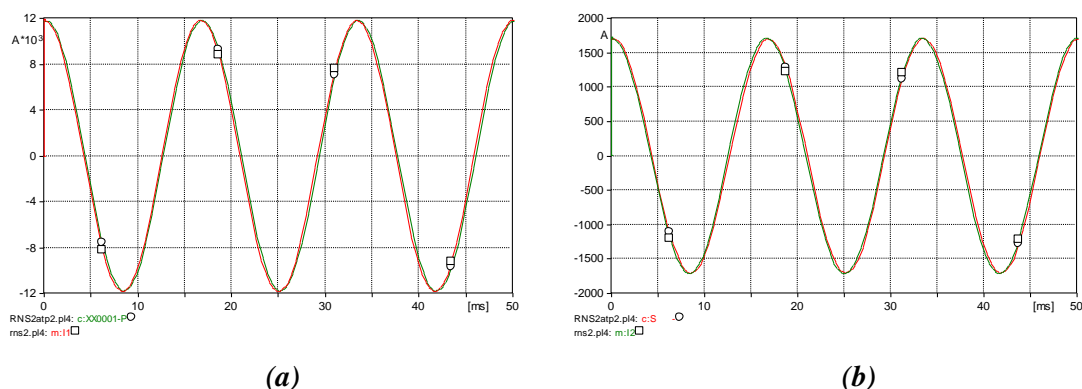


Figura 5.24 – Correntes no primário MODELS (□) e ATP (○)(a) e Correntes no secundário MODELS (□) e ATP (○)(b) teste em plena carga.

Os valores de picos e os erros das correntes simuladas acima estão contida na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Comparações da corrente nos teste do transformador

TESTE	MODELS		ATP		ERRO	
	i1 (A)	i2 (A)	i1 (A)	i2 (A)	i1 (A)	i2 (A)
Vazio	2,344	0,1107	2,485	0,1107	5,67%	0,00%
Curto Circuito	17170	2481	17090	2469	0,47%	0,49%
Plena Carga	11820	1707	11790	1703	0,25%	0,23%

Os resultados mostrado na Tabela 5.8 foram satisfatórios, somente o teste em vazio que houve um percentual de erro de 5,67%, mas como os valores das simulações são valores de grandeza

baixas, o erro pode ser considerado insignificante. Representamos o reator monofásico no modelo UMEC na rotina da MODELS, seus resultados comparados com o modelo do ATP foram equivalente. Próximo item vamos representar a simulação do modelo de reatores naturalmente saturados trifásicos projetado pelo LDSP, afim de melhorar, aprimorar os resultados simulados pelo ATP.

5.2 – Modelo UMEC Trifásico na MODELS

5.2.1 – Reator Saturado trifásico com 3 Núcleos, 6 Enrolamentos e 2 Retornos – RNS6Yd

Os pontos da curva B x H nesse reator será inserido os 48 pontos da curva para obter resultados mais precisos, os dados do transformador do RNS6 estão na Tabela 5.9: O tipo de ligação do reator naturalmente saturado é estrela (não aterrado) Delta conforme Figura 5.25.

Tabela 5.9 – *Dados entrada RNS6 Trifásico Estrela-Delta*

DADOS ENTRADA	
Aw	0,0154 (m2)
Lw1	0,390 (m)
Lw2	0,270 (m)
Ay	0,0154 (m2)
Ly	0,3608 (m)
Ar	0,0154 (m2)
Lr	0,800 (m)
N0	195
N3	98
Ld0	5,69 (mH)
Ld3	10,68 (mH)
V1	3 KV

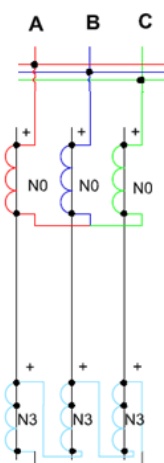


Figura 5.25 – *Ligação estrela – Delta do Reator*

O circuito representando o RNS6Yd está mostrado na Figura 5.26. Sua caixa de dados na Figura 5.27.

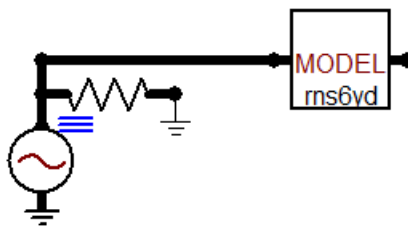


Figura 5.26 – Circuito do RNS6 na MODELS no ATP

MODEL: RNS6Yd

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
Aw		0.0158
Ay		0.0158
Ar		0.0158
N0		195
N3		98
Lw1		0.39
Lw2		0.27
Ly		0.3608

NODE	PHASE	NAME
v	ABC	X0002
v2	ABC	X0001

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

Models Library

Model: RNS6Yd Edit Use As: RNS6Yd Record

Hide Protect

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 5.27 – Dados de entrada da MODELS no ATP

A curva $B \times H$ está mostrado na Figura 5.28:

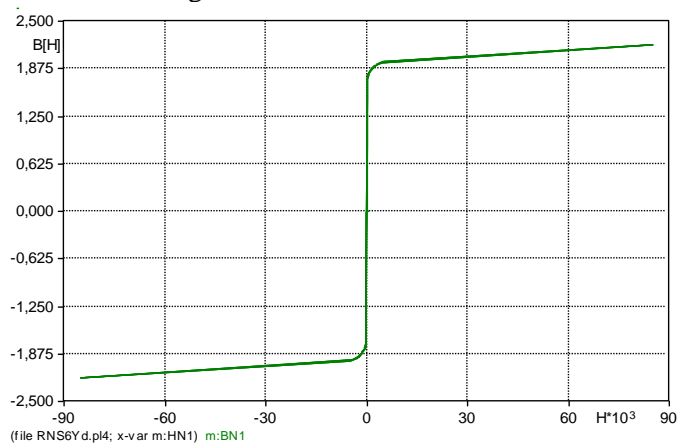


Figura 5.28 – Curva $B \times H$ na MODELS.

As formas de onda das tensões no primário estão mostrados na Figura 5.29.

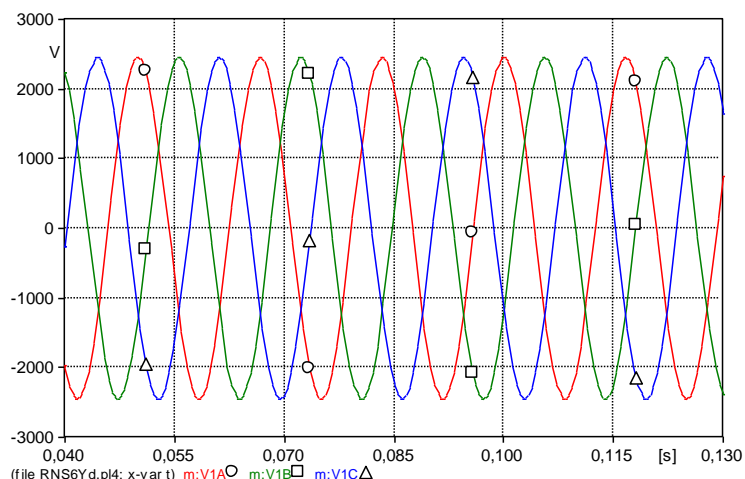


Figura 5.29 – Tensão no primário fase A (\circ), fase B (\square) e fase C (Δ) do RNS6Yd na MODELS

A forma de onda da corrente no primário na fase A está mostrado na Figura 5.30, e as formas de onda das correntes todas as fases do primário na Figura 5.31.

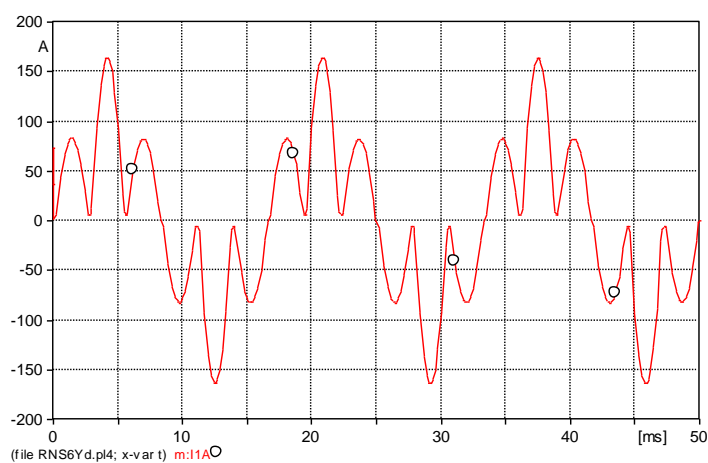


Figura 5.30 – Corrente no primário fase A (\circ) do RNS6Yd na MODELS

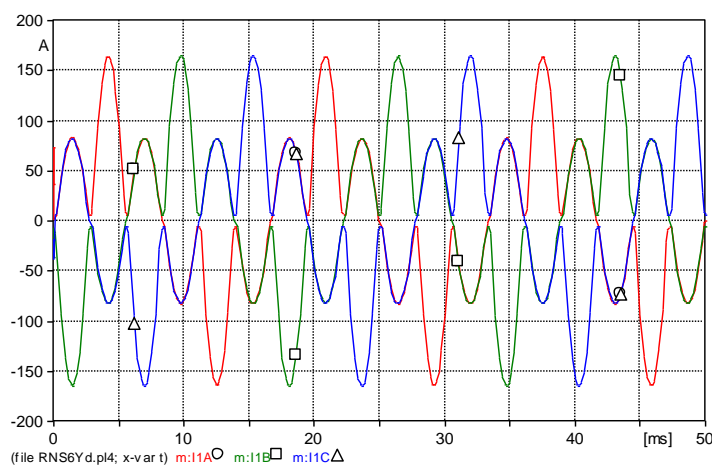


Figura 5.31 – Corrente no primário fase A (\circ), fase B (\square) e fase C (Δ) do RNS6Yd na MODELS

A. Comparação no ATP com elemento TRANSFORMADOR SATURAVEL:

O circuito representando o transformador saturável trifásico no ATPDraw está mostrado na Figura 5.32.

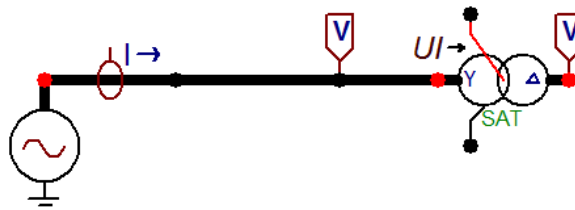


Figura 5.32 – Circuito do transformador saturável trifásico no ATPDraw.

Os dados da curva $\lambda \times i$ inserido no componente estão da Tabela 5.10 e dados do transformador na Figura 5.33.

Tabela 5.10 – Dados da Curva $\lambda \times i$

Imag	λ
0,0490	1,2015
0,0832	2,7034
0,1025	3,6046
0,1528	4,3555
0,2416	4,7461
0,4897	5,0466
0,9304	5,2271
2,5138	5,4384
4,8971	5,5902
41,0256	5,9444

Na tabela 5.10 estão os pontos da Curva $\lambda \times i$ referente a 9 trechos nas simulações foram colocados os 48 pontos para resultados mais precisos.

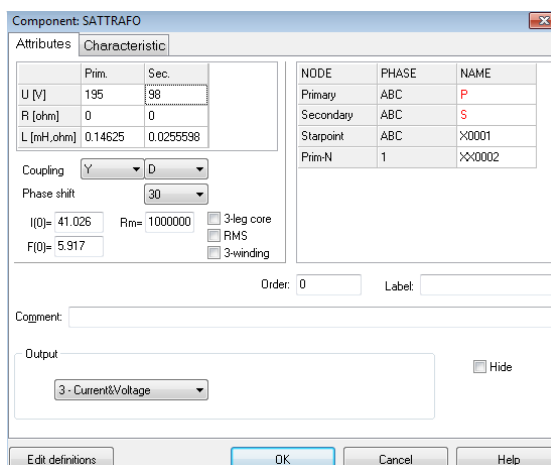


Figura 5.33 – Caixa de dados do transformador saturável trifásico no ATPDraw.

A forma de onda da correntes no primário fase A no ATP e da MODELS estão na Figura 5.34 e a forma de onda das correntes no primário fase A, B e C no ATP e da MODELS estão na Figura 5.35.

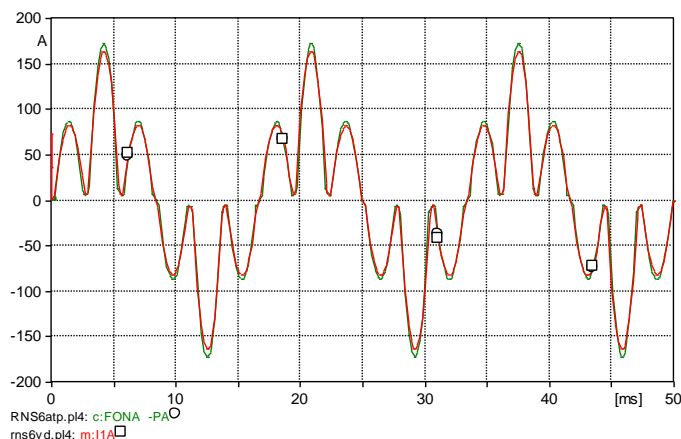


Figura 5.34 – Corrente no primário da MODELS na fase A (□) e no ATPDraw Fase A (○).

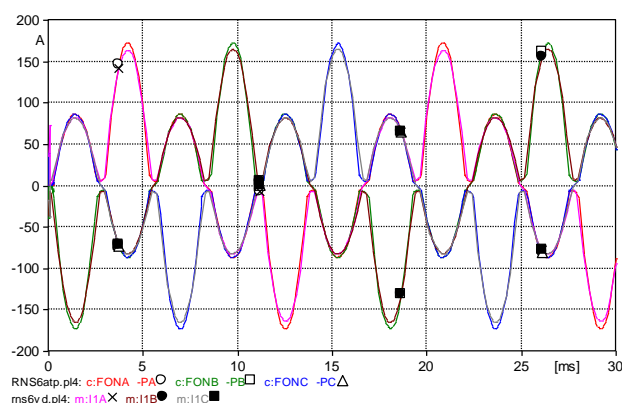


Figura 5.35 – Correntes no primário da MODELS na fase A (×), B (●) e C (■) e no ATPDraw Fase A (○), B (□) e C (Δ)

Os valores de picos e os erros das correntes simuladas acima estão contida na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Comparações das correntes do RNS6Yd na MODELS e ATP

	MODELS			ATP			ERRO		
	iA (A)	iB (A)	iC (A)	iA (A)	iB (A)	iC (A)	iA (A)	iB (A)	iC (A)
Primário	163,97	164,92	164,9	172,84	172,77	172,79	5,13%	4,54%	4,57%

Os resultados encontrados nas simulações foram muito satisfatórios. Pela liberdade do formato do programa na linguagem da MODELS pode ser inserido no programa outras grandezas como as perdas dos reatores que na pratica ocorrem e ainda têm as vantagens de obter resultados das formas

de ondas de grandezas magnéticas como fluxo, permeância, curva $B \times H$ que não são obtidos no modelo do ATP.

5.2.2 - Reator Saturado trifásico com 3 núcleos, 6 enrolamentos e 2 retornos com perdas histerese - RNS6YdH

No capítulo 4 é mostrado o algoritmo da determinar a curva $B \times H$ considerando o laço de histerese conforme a Figura 4.6. Acrescentando esse algoritmo no reator saturado trifásico com 3 núcleos, 6 enrolamentos e 2 retornos com perdas histerese a curva $B \times H$ é representada na Figura 5.36. Na Figura 5.37 representa a curva $B \times H$ da Figura 5.36 ampliada.

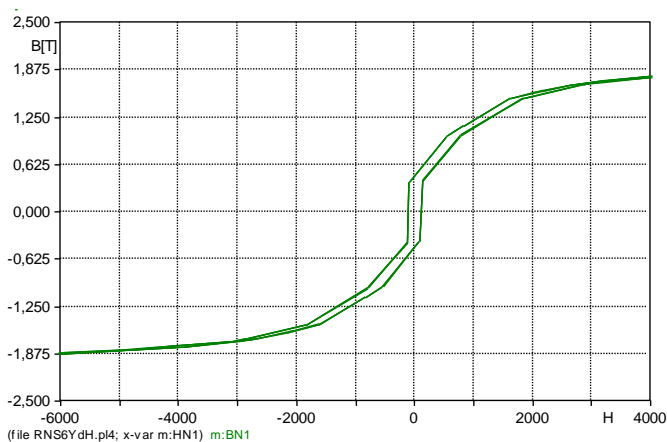


Figura 5.36 – Curva $B \times H$ com laço de histerese

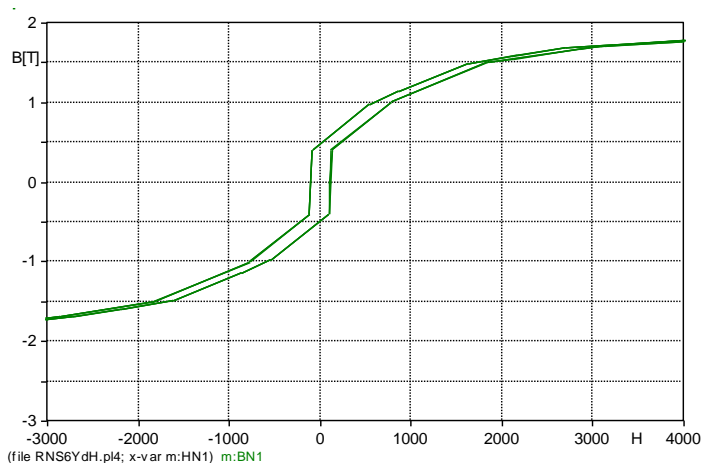


Figura 5.37 – Curva $B \times H$ com laço de histerese ampliado

Comparando as correntes do primário do RNS6Yd sem perdas de histerese com RNS6YdH com perdas histerese a forma de onda da corrente Fase A do primário está representada na Figura 5.38. A comparação das formas de ondas das Correntes Fase A, B e C dos reatores com e sem perdas por histerese estão na Figura 5.39.

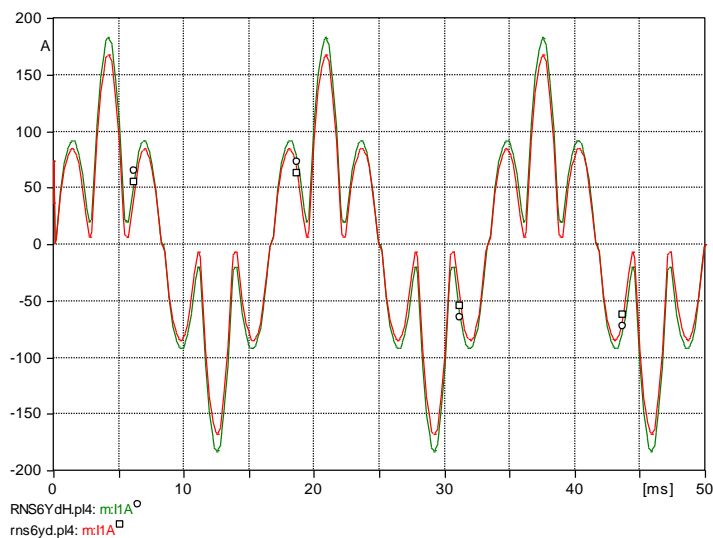


Figura 5.38 – Corrente no primário do RNS6Yd na fase A (□) e no RNS6YdH com perdas por histerese Fase A(○).

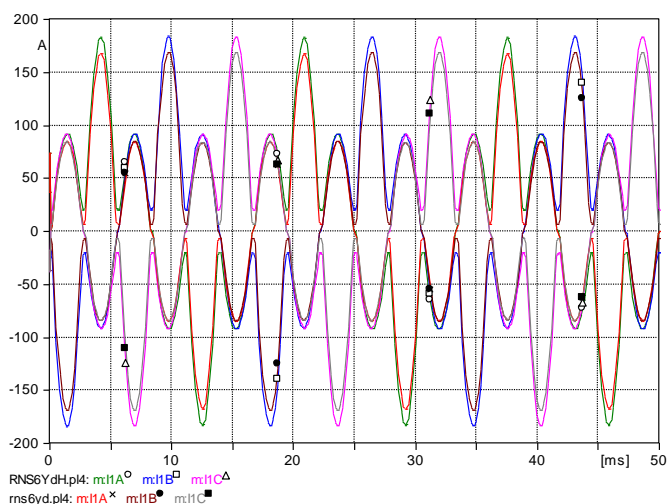


Figura 5.39 – Correntes no primário do RNS6Yd na fase A (×), B (●) e C (■) e no RNS6YdH Fase A (○), B (□) e C (Δ)

Os valores de picos das correntes simuladas acima estão contida na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Comparações das correntes do RNS6Yd e do RNS6YdH com perdas histerese

	RNS6Yd			RNS6YdH			DIFERENÇA		
	iA (A)	iB (A)	iC (A)	iA (A)	iB (A)	iC (A)	iA (A)	iB (A)	iC (A)
Primário	168,08	169,21	169,13	182,73	183,88	183,8	8,02%	7,98%	7,98%

Conforme esperada a corrente de entrada do RNS6YdH com perdas histerese é maior que a corrente de entrada do RNS6Yd sem perdas por histerese.

5.2.3 – Reator Saturado trifásico com 3 núcleos, 9 enrolamentos e 2 retornos – RNS9Zigd

O RNS9Zigd é projetado para consistir de FMMs de módulo idênticos ao RNS6Yd, porém defasadas uma das outra de $\pi/9$ radianos[1]. A ligação desse reator naturalmente saturado é ZigZag-Delta conforme Figura 5.40.

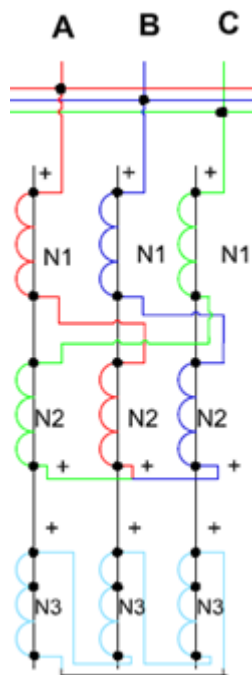


Figura 5.40 – Ligação ZigZag-delta do Reator da MODELS

Os pontos da curva B x H são as mesma no RNS6Yd considerando os 48 pontos para resultados mais precisos e os dados do transformador do RNS9Zigd estão na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Dados entrada RNS9 Trifásico ZigZag-Delta

DADOS ENTRADA	
Aw	0,0154 (m2)
Lw1	0,290 (m)
Lw2	0,154 (m)
Lw3	0,270 (m)
Ay	0,0154 (m2)
Ly	0,902
Ar	0,0154 (m2)
Lr	0,800 (m)
N1	145
N2	77
N3	98
Ld1	0,0512 (mH)
Ld2	0,12793 (mH)
Ld3	10,8 (mH)
V	3 KV

O circuito representando do RNS9 está mostrado na Figura 5.41. Sua caixa de dados na Figura 5.42.

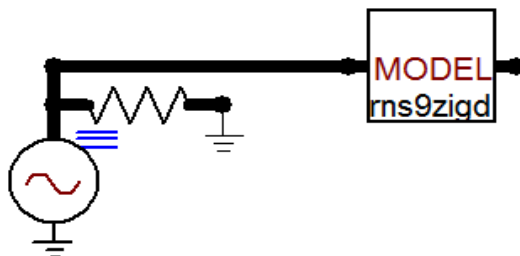


Figura 5.41 – Circuito do RNS9 na MODELS no ATP

DATA	UNIT	VALUE
Aw		0.0158
Ay		0.0158
Ar		0.0158
N1		145
N2		77
N3		98
Lw1		0.29
Lw2		0.154

NODE	PHASE	NAME
v	ABC	x0002
v3	ABC	x0001

Figura 5.42 – Dados de entrada da MODELS no ATP.

A curva $B \times H$ está mostrado na Figura 5.43:

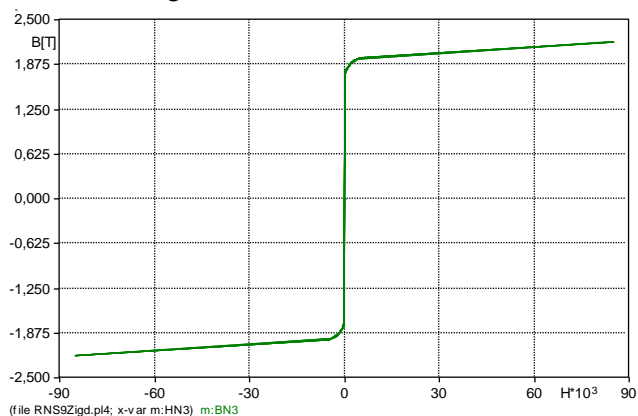


Figura 5.43 – Curva $B \times H$ na MODELS.

A formas de onda das tensões no primário da MODELS fase A, B e C estão na Figura 5.44.

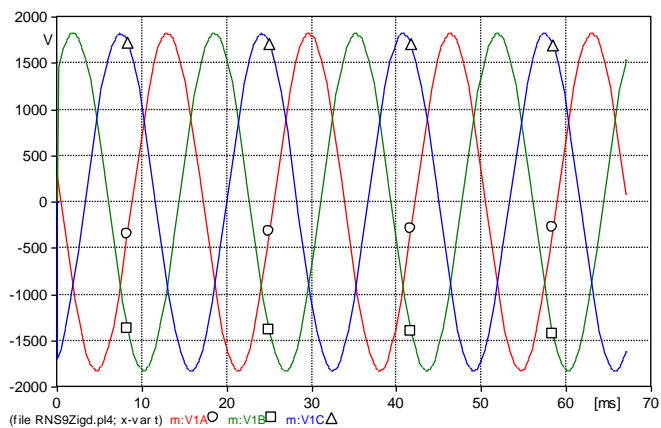


Figura 5.44 – Tensões no Primário fase A (○), B (□) e C (△) do RNS9Zigd na MODELS

A formas de onda da corrente no primário Fase A da MODELS do RNS9Zigd está na Figura 5.45, e a forma de onda das correntes no primário Fase A, B e C do RNS9Zigd estão na Figura 5.46.

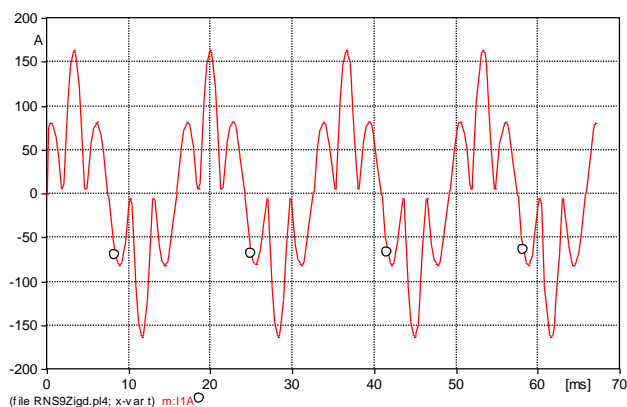


Figura 5.45 – Corrente no Primário fase A (○) do RNS9Zigd na MODELS

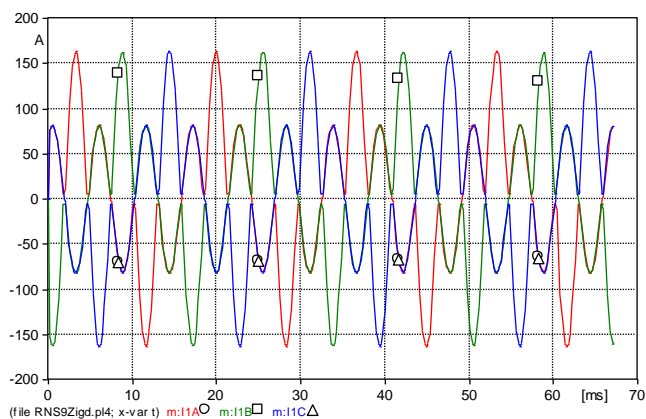


Figura 5.46 – Corrente no Primário fase A (○), B (□) e C (△) do RNS9Zigd na MODELS

A. Comparação entre RNS6Yd e RNS9Zigd:

As comparações das formas de onda das correntes no primário do RNS6Yd e RNS9Zigd na fase A está mostrado na Figura 5.47.

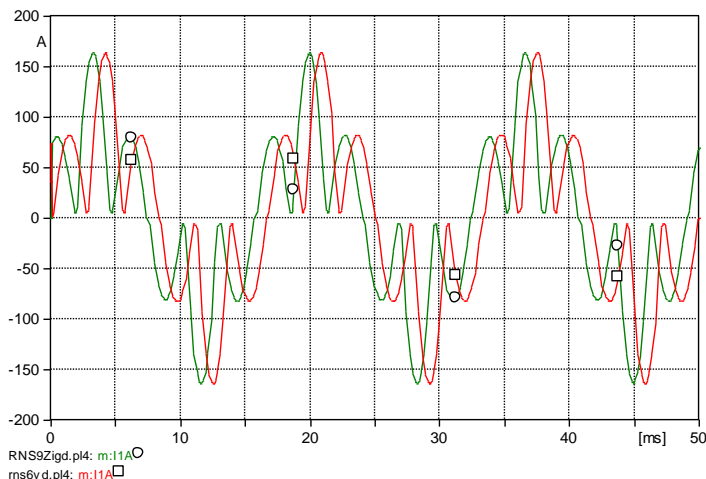


Figura 5.47 – Corrente fase A no primário (□) RNS6Yd e (○) RNS9Zigd na MODELS.

O RNS9Zigd têm suas correntes aproximadas da corrente do RNS6Yd, porém defasadas uma das outra de $\pi/9$ radianos, pois o RNS9Zigd foi projetado para consistir de FMMs de módulo idênticos ao RNS6Yd.

B. Comparação entre RNS9zigd e ATP:

Como esse reator foi projetado pelo LDSP vamos comparar a corrente no primário do reator saturado simulado na linguagem MODELS com a simulação adquirida pelo LDSP.

A forma de onda da Corrente Fase A da MODELS e do ATP está representado na Figura 5.48. A forma de onda das Correntes Fase A, B e C da MODELS e do ATP estão na Figura 5.49

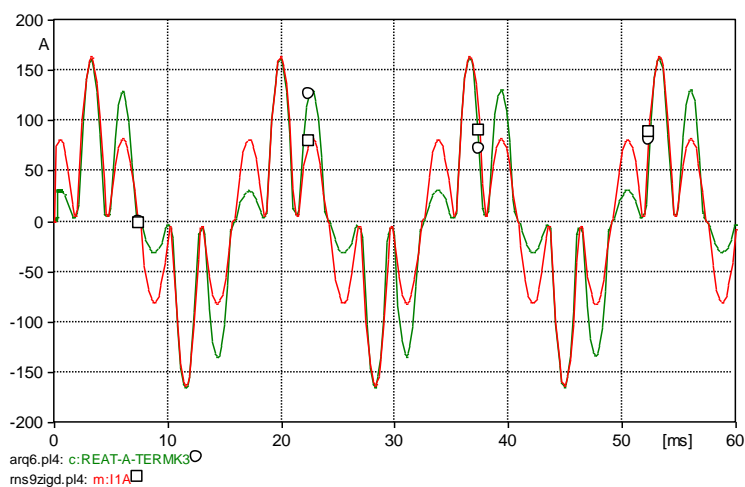


Figura 5.48 – Corrente fase A no primário (□)RNS9Zigd na MODELS e (○) arq6 no ATP

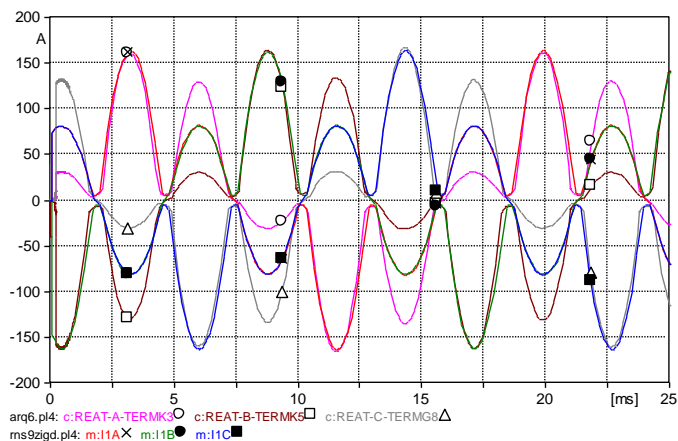


Figura 5.49 – Correntes no primário do RNS9Zigd na MODLES fase A (\times), B(\bullet) e C(\blacksquare) e no Arq6 no ATP Fase A(\circ), B(\square) e C(Δ)

Os valores de picos das correntes simuladas acima estão contida na Tabela 5.14.

Tabela 5.14 – Comparações das correntes do RNS9Zigd da MODLES e do Arq6 no ATP

	MODELS			ATP			ERRO		
	iA (A)	iB (A)	iC (A)	iA (A)	iB (A)	iC (A)	iA (A)	iB (A)	iC (A)
Primário	163,21	162,24	163,27	160,87	164,34	166,43	1,45%	1,28%	1,90%

Os valores de picos estão semelhantes conforme a Tabela 5.14, mas o forma de onda das correntes conforme Figura 5.54 são diferentes, pois no ATP o modelo de reatores com 3 enrolamentos têm a arquitetura considerando os enrolamentos acoplados com mesmo comprimento médio magnético conforme Figura 3.27. O reator naturalmente saturado com 3 núcleos e 9 enrolamentos projetado no LDSP têm a arquitetura considerando os enrolamentos com comprimentos magnéticos diferentes conforme Figura 3.28.

A diferencia entre as arquitetura dos enrolamentos para modelo UMEC implica somente no comprimento magnético do enrolamentos. Considerando os comprimentos iguais conforme a simulação do ATP a forma de onda da corrente do RNS9Zigd é representada na Figura 5.50.

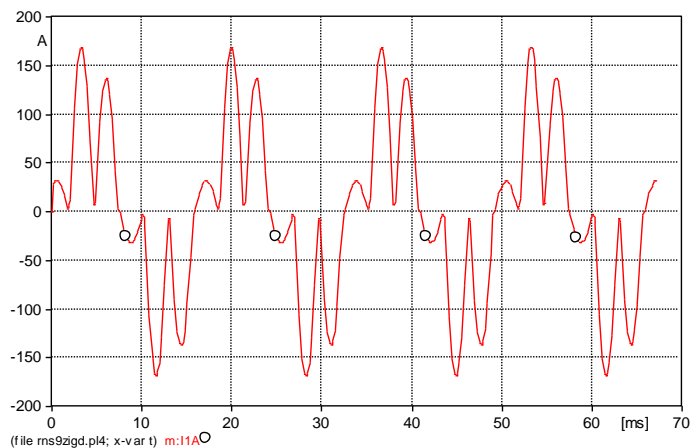


Figura 5.50 – Corrente do RNS9Zigd na MODLES fase A considerando arquitetura do ATP

A forma de onda das correntes da MODELS e do ATP para comparação considerando a mesma arquitetura dos enrolamentos estão representada na Figura 5.51.

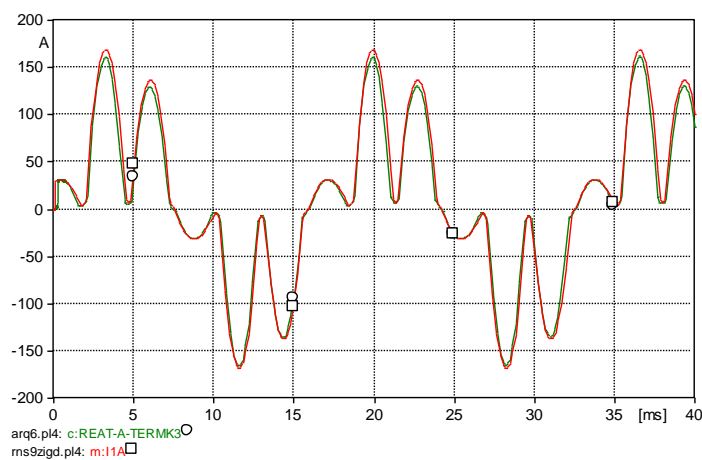


Figura 5.51 – Corrente fase A no primário (\square)RNS9Zigd na MODELS e (\circ) arq6 no ATP

5.2.4 Reator Naturalmente Saturado trifásico com 3 núcleos, 9 enrolamentos e 2 retornos com perdas histerese – RNS9ZigdH

No capítulo 4 é mostrado o algoritmo da determinar a curva B x H considerando o laço de histerese conforme a Figura 4.7. Acrescentando esse algoritmo no reator saturado trifásico com 3 núcleos, 9 enrolamentos e 2 retornos com perdas histerese a curva B x H é representada na Figura 5.52.

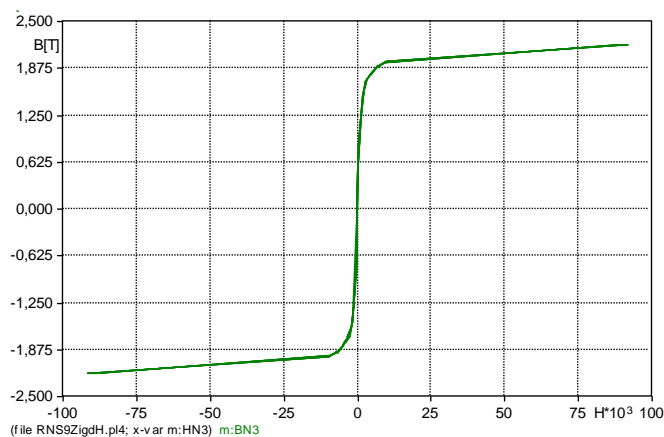


Figura 5.52 – Curva B x H com laço de histerese

Comparando as correntes do primário do RNS9Zigd sem perdas de histerese com RNS9ZigdH com perdas histerese, a forma de onda da corrente Fase A do primário está representada na Figura 5.53. A comparação das formas de ondas das Correntes Fase A, B e C dos reatores com e sem perdas por histerese estão na Figura 5.54.

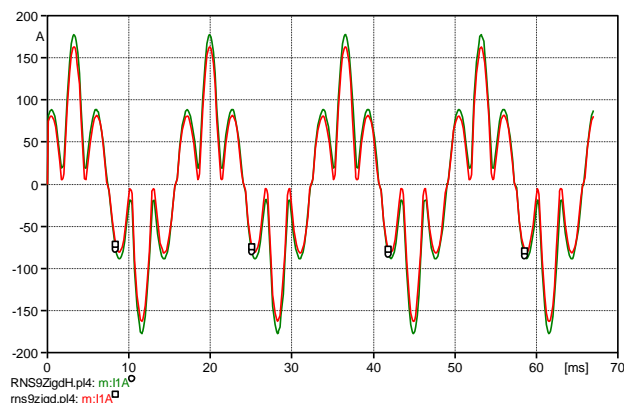


Figura 5.53 – Corrente no primário do RNS9Zigd na fase A (\square) e no RNS9ZigdH com perdas por histerese Fase A (\circ).

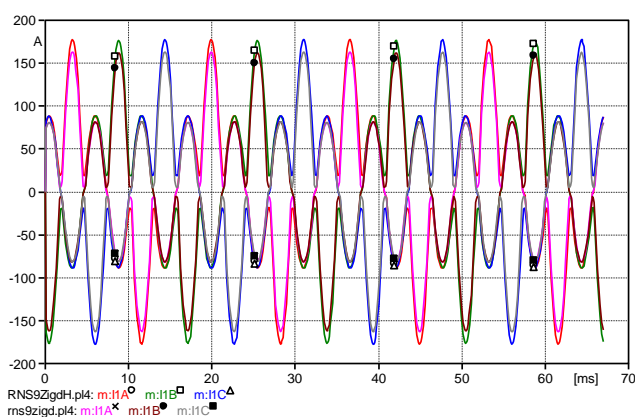


Figura 5.54 – Correntes no primário do RNS9Zigd na fase A (\times), B (\bullet) e C (\blacksquare) e no RNS9ZigdH Fase A (\circ), B (\square) e C (Δ)

Os valores de picos das correntes simuladas acima estão contida na Tabela 5.15.

Tabela 5.15 – Comparações das correntes do RNS9Zigd e do RNS9ZigdH com perdas histerese

	RNS9Zigd			RNS9ZigdH			DIFERENÇA		
	iA (A)	iB (A)	iC (A)	iA (A)	iB (A)	iC (A)	iA (A)	iB (A)	iC (A)
Primário	163,14	162,19	163,27	177,52	176,55	177,65	8,10%	8,13%	8,09%

Conforme esperado a corrente de entrada do RNS9ZigdH considerando as perdas por histerese é maior que a corrente de entrada do RNS9Zigd sem as perdas por histerese.

5.2.5 – Reator Saturado trifásico com 3 núcleos, 9 enrolamentos e 2 retornos – RNS9Zagd

O RNS9Zagd tem os mesmo dados do reator RNS9Zigd do item anterior somente difere da sua ligação ZigZag-delta conforme Figura 5.55.

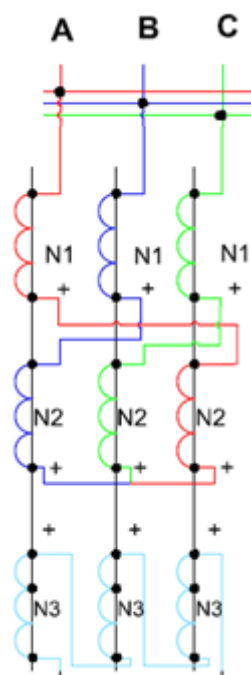


Figura 5.55 – Ligação ZigZag-delta do Reator da MODELS

A formas de onda da corrente no primário Fase A da MODELS do RNS9Zagd está na Figura 5.56, e a forma de onda das correntes no primário Fase A, B e C do RNS9Zagd estão na Figura 5.57.

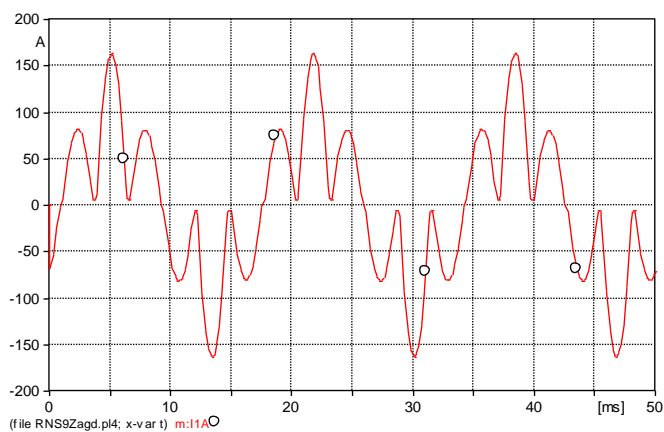


Figura 5.56 – Corrente no Primário fase A (○) do RNS9Zagd na MODELS

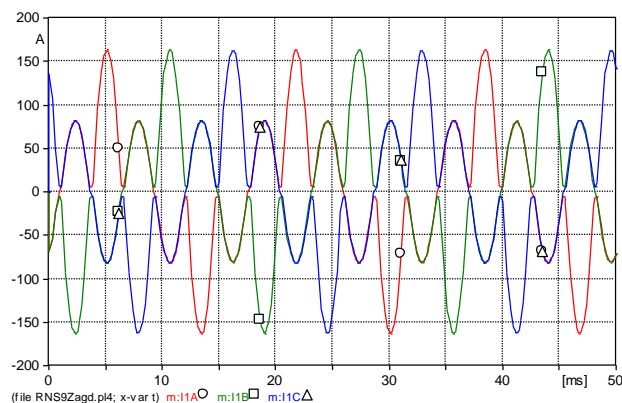


Figura 5.57 – Corrente no Primário fase A (○), B (□) e C (△) do RNS9Zagd na MODELS

A. Comparação entre RNS6Yd, RNS9Zigd e RNS9Zagd:

As comparações das formas de onda das correntes no primário do RNS6Yd, RNS9Zigd e RNS9Zagd na fase A está mostrado na Figura 5.58.

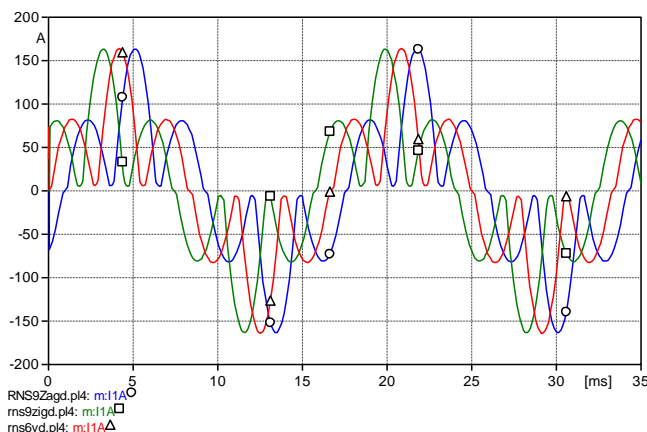


Figura 5.58 – Corrente fase A no primário(○)RNS9Zagd, (□)RNS9Zigd e (△)RNS6Yd na MODELS.

O RNS9Zagd têm suas correntes aproximadas da corrente do RNS6Yd e RNS6Zagd, porém defasadas uma das outra de $\pi/9$ radianos, pois o RNS9Zagd foi projetado para consistir de FMMs de módulo idênticos ao RNS6Yd e RNS9Zigd.

B. Comparação entre RNS9zagd e ATP:

Como esse reator foi projetado pelo LDSP vamos comparar a corrente no primário do reator saturado simulado na linguagem MODELS com a simulação adquirida pelo LDSP.

A forma de onda da Corrente Fase A da MODELS e do ATP está representado na Figura 5.59. A forma de onda das Correntes Fase A, B e C da MODELS e do ATP estão na Figura 5.60.

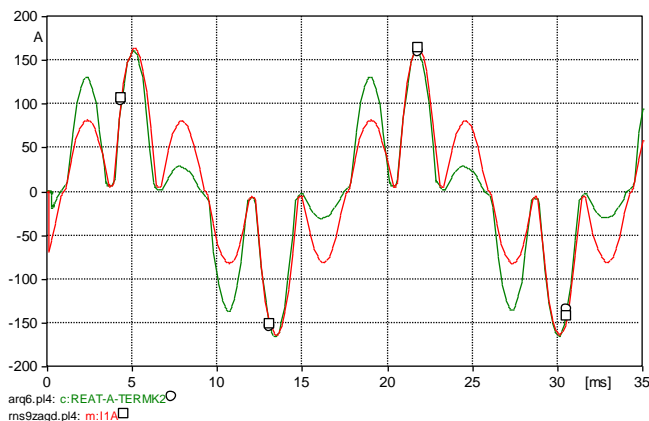


Figura 5.59 – Corrente fase A no primário (□)RNS9Zagd na MODELS e (○) arq6 no ATP

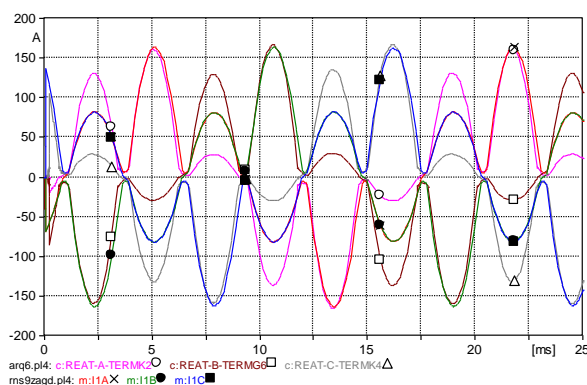


Figura 5.60 – Correntes no primário do RNS9Zag na MODLES fase A (×), B(●) e C(■) e no Arq6 no ATP Fase A(○), B(□) e C(Δ)

Os valores de picos das correntes simuladas acima estão contida na Tabela 5.16.

Tabela 5.16 – Comparações das correntes do RNS9Zagd da MODELS e do Arq6 no ATP

	MODELS			ATP			ERRO		
	iA (A)	iB (A)	iC (A)	iA (A)	iB (A)	iC (A)	iA (A)	iB (A)	iC (A)
Primário	162,22	163,21	162,31	160,43	166,2	166,67	1,12%	1,80%	2,62%

Os valores de picos estão semelhantes conforme a Tabela 5.16, mas o forma de onda das correntes conforme Figura 5.59 são diferentes, pois no ATP o modelo de reatores com 3 enrolamentos têm a arquitetura considerando os enrolamentos acoplados com mesmo comprimento médio magnético conforme Figura 3.27. O reator naturalmente saturado com 3 núcleos e 9 enrolamentos projetado no LDSP têm a arquitetura considerando os enrolamentos com comprimentos magnéticos diferentes conforme Figura 3.28.

A diferença entre as arquitetura dos enrolamentos para modelo UMEC implica somente no comprimento magnético do enrolamentos. Considerando os comprimentos iguais conforme a simulação do ATP a forma de onda da corrente do RNS9Zagd é representada na Figura 5.61.

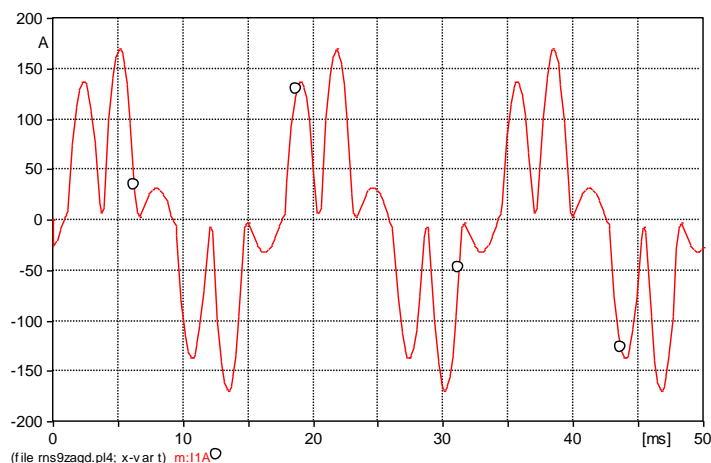


Figura 5.61 – Corrente do RNS9Zagd na MODLES fase A considerando arquitetura com comprimentos iguais

A forma de onda das correntes da MODELS e do ATP para comparação considerando a mesma arquitetura dos enrolamentos estão representada na Figura 5.62.

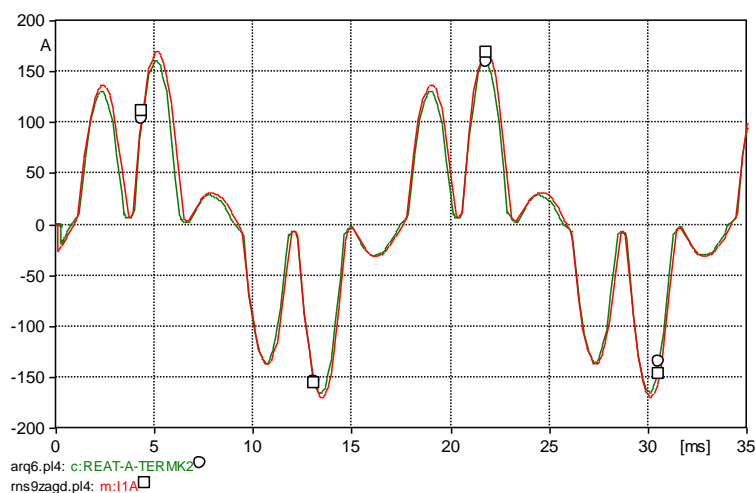


Figura 5.62 – Corrente fase A no primário (□)RNS9Zagd na MODELS e (○) arq6 no ATP

5.2.6 - Reator Naturalmente Saturado trifásico com 3 núcleos, 9 enrolamentos e 2 retornos com perdas histerese – RNS9ZagdH

No capítulo 4 é mostrado o algoritmo da determinar a curva B x H considerando o laço de histerese conforme a Figura 4.7. Como esse reator RNS9Zagd tem as mesmas características e dados do reator RNS9Ziagd, acrescentando o algoritmo da curva B x H com laço no reator RNS9ZigdH. Comparando as correntes do primário do RNS9Zagd sem perdas de histerese com RNS9ZagdH com perdas histerese, a forma de onda da corrente Fase A do primário está representada na Figura 5.63. A comparação das formas de ondas das Correntes Fase A, B e C dos reatores com e sem perdas por histerese estão na Figura 5.64.

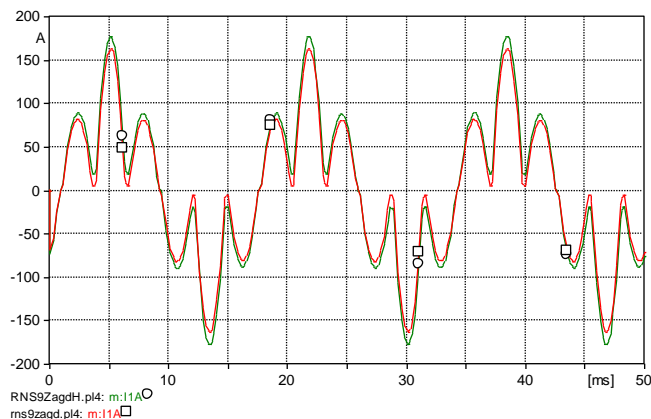


Figura 5.63 – Corrente no primário do RNS9Zagd na fase A (\square) e no RNS9ZagdH com perdas por histerese Fase A (\circ).

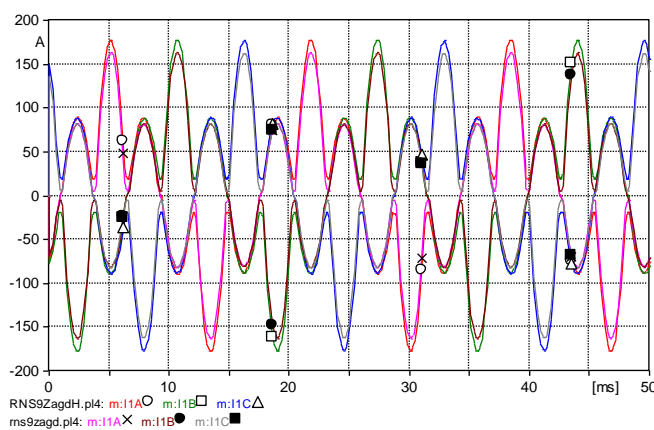


Figura 5.64 – Correntes no primário do RNS9Zagd na fase A (\times), B (\bullet) e C (\blacksquare) e no RNS9ZagdH Fase A (\circ), B (\square) e C (Δ)

Os valores de picos das correntes simuladas acima estão contida na Tabela 5.17.

Tabela 5.17 – Comparações das correntes do RNS9Zagd e do RNS9ZagdH com perdas histerese

	RNS9Zigd			RNS9ZigdH			DIFERENÇA		
	iA (A)	iB (A)	iC (A)	iA (A)	iB (A)	iC (A)	iA (A)	iB (A)	iC (A)
Primário	163,37	163,29	162,35	177,65	177,57	176,61	8,04%	8,04%	8,07%

Conforme esperado a corrente de entrada do reator naturalmente saturado considerando as perdas por histerese, tabela 5.17, é maior que a corrente de entrada do reator naturalmente saturado sem as perdas por histerese.

5.2.7 – Reator Naturalmente Saturado trifásico com 9 núcleos, 24 enrolamentos e 6 retornos – RNS699

Um dos reatores desenvolvido e projetado pelo LDSP é formado por um reator naturalmente saturado trifásico com 6 enrolamentos em paralelo com dois reatores naturalmente saturado trifásico com 9 enrolamentos. Com finalidade de testar os reatores naturalmente saturados desenvolvido pelo modelo UMEC em rotina na MODELS, foi desenvolvido o reator saturado RNS699 constituído de 9 núcleos e 24 enrolamentos, formados pela conexão dos reatores saturados RNS6 e RNS9 em paralelo uns com os outros assinalado nas Figuras 5.65 e 5.66. Conforme descrito no Capítulo 3 a arquitetura dos enrolamentos considerados desse reator foi conforme projeto com comprimentos magnéticos diferentes como representado na Figura 3.28.

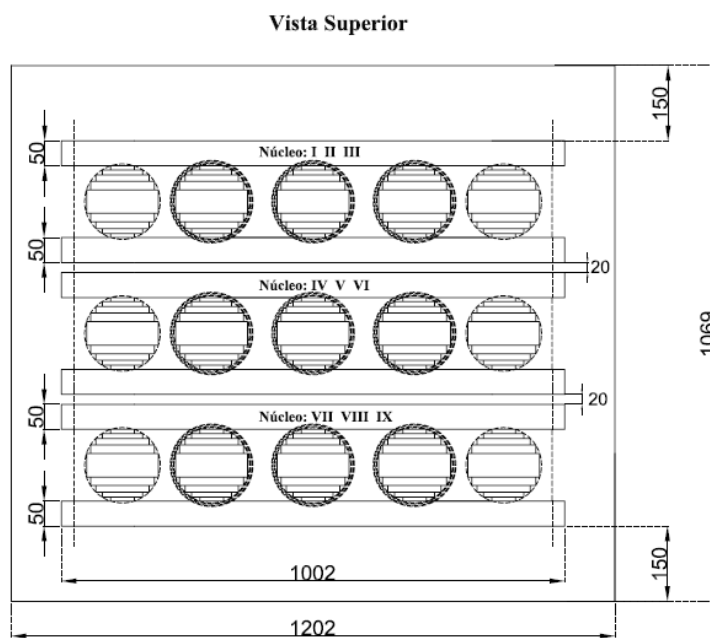


Figura 5.65 – Vista superior RNS699.

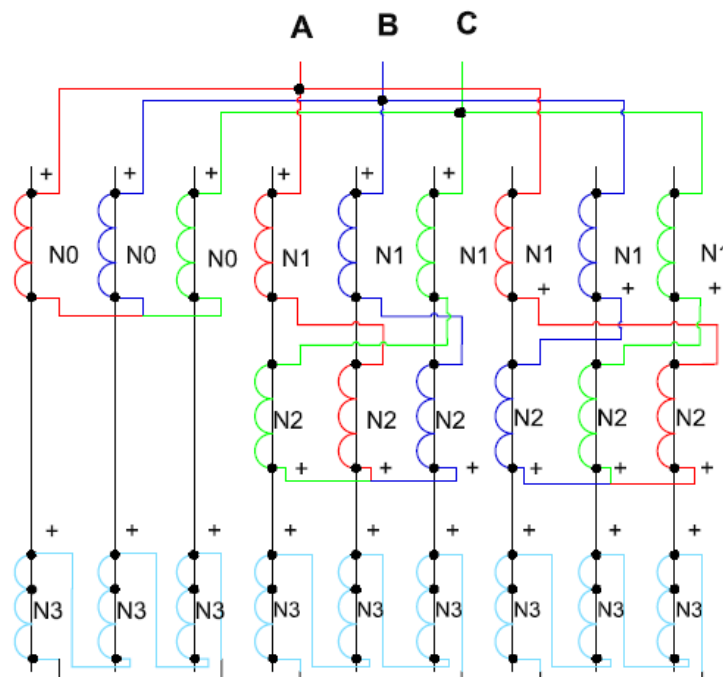


Figura 5.66 – Diagrama do RNS699 ligação em paralelo.

O circuito representando o RNS699 está mostrado na Figura 5.67. Sua caixa de dados na Figura 5.68.

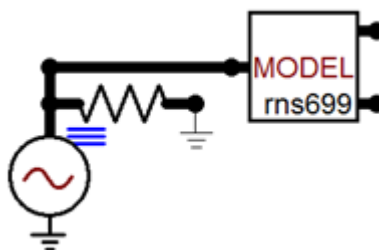


Figura 5.67 – Circuito do RNS699 na MODELS no ATP

MODEL: RNS699

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
Aw		0.0158	v	ABC	×0003
Ay		0.0158	v3	ABC	×0001
Ar		0.0158	v2S	ABC	×0002
N0		195			
N1		145			
N2		77			
N3		98			
Lwz1		0.29			

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

Models Library

Model: RNS699 Edit Use As: RNS699 Record

Hide Protect

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 5.68 – Dados de entrada da MODELS no ATP.

As formas de onda das correntes no primário nos enrolamentos de 1 a 6 na Figura 5.69 e nos enrolamentos 7 a 9 estão mostrados na Figura 5.70.

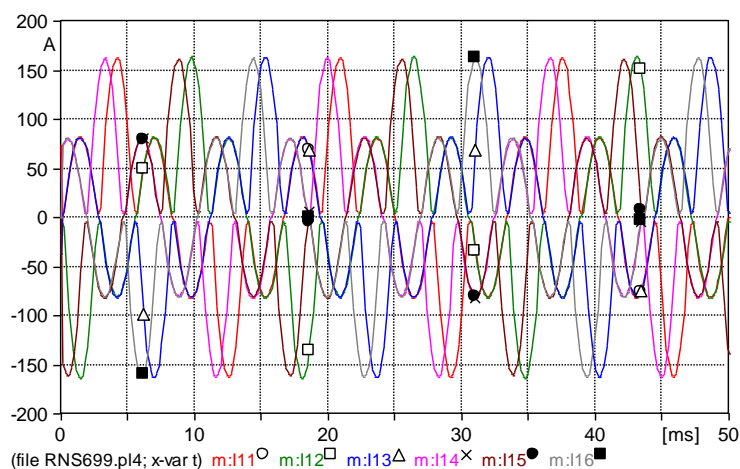


Figura 5.69 – Correntes no primário nos enrolamento 1 a 6 do RNS699.

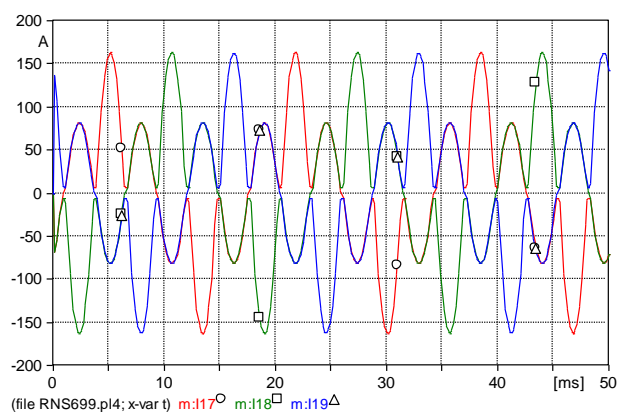


Figura 5.70 – Correntes no primário nos enrolamento 7 a 9 do RNS699.

Como esperado as correntes das Figuras 5.68 e 5.69 representando cada núcleo do reator são iguais as simulações representadas anteriormente individualmente. O objetivo desses reatores ligados em paralelo é representar a corrente Total no primário do Reator Naturalmente Saturado com 9 núcleos, 24 enrolamentos e 6 retornos.

A forma de onda da corrente de entrada na fase A do Reator Naturalmente Trifásico com 9 núcleos, 24 enrolamentos e 6 retornos está na Figura 5.71, e as formas de ondas das correntes de entrada na Fase A, B e C do RNS699 estão mostrados na Figura 5.72.

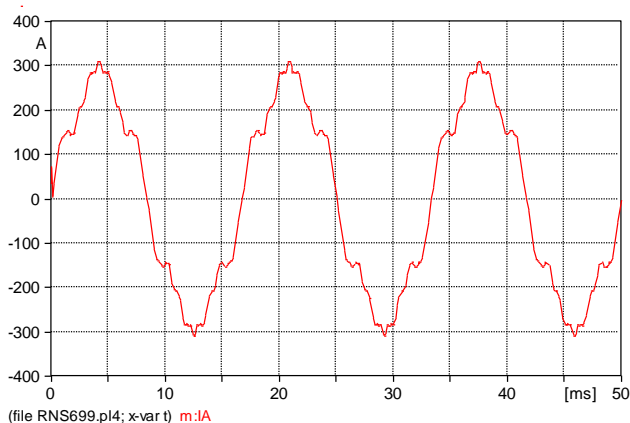


Figura 5.71 – Correntes de entrada na fase A do RNS699.

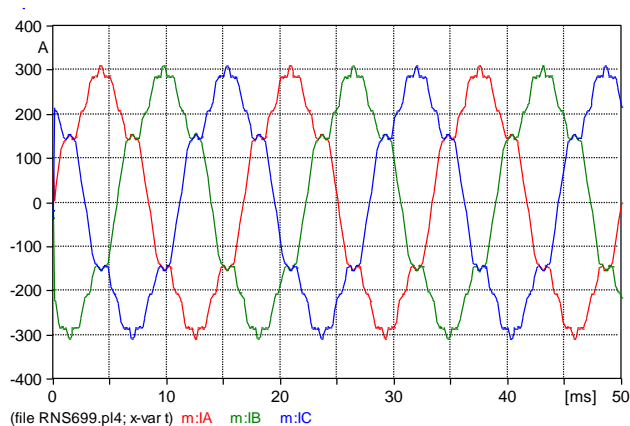


Figura 5.72 – Correntes de entrada nas fases A(\circ), B(\square) e C(Δ) do RNS699.

A. Comparação entre o RNS699 e ATP:

Esse reator foi projetado pelo LDSP vamos comparar a corrente no primário do reator saturado simulado na linguagem MODELS com a simulação no ATP adquirida pelo LDSP.

A forma de onda da Corrente Fase A da MODELS e do ATP está representado na Figura 5.73 e a forma de onda das Correntes Fase A, B e C da MODELS e do ATP estão na Figura 5.74

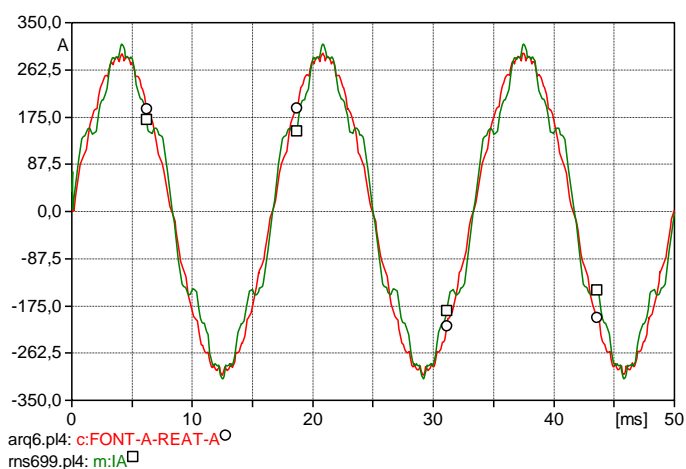


Figura 5.73 – Corrente fase A no primário (\square)RNS699 na MODELS e (\circ) arq6 no ATP

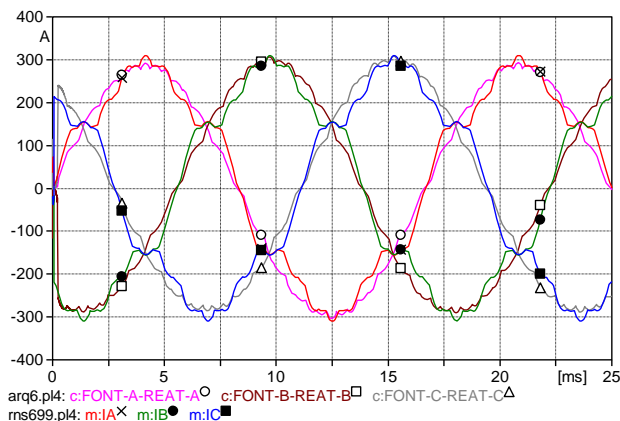


Figura 5.74 – Correntes no primário do RNS699 na MODLES fase A (×), B(●) e C(■) e no Arq6 no ATP Fase A(○), B(□) e C(Δ)

Os valores de picos das correntes simuladas acima estão contida na Tabela 5.18.

Tabela 5.18 – Comparações das correntes do RNS9Zagd da MODELS e do Arq6 no ATP

	MODELS			ATP			ERRO		
	iA (A)	iB (A)	iC (A)	iA (A)	iB (A)	iC (A)	iA (A)	iB (A)	iC (A)
Primário	309,65	309,1	309,01	292,06	306,39	308,9	6,02%	0,88%	0,04%

A diferença entre as formas de onda da corrente é devido a diferença da arquitetura dos enrolamentos conforme descrito no capítulo 3, a simulação na MODELS foi considerado a arquitetura dos enrolamentos considerando os comprimentos magnéticos dos enrolamentos diferentes como na Figura 5.75, a simulação do ATP fornecida pelo LDSP foi considerado a arquitetura dos enrolamentos considerando os comprimentos magnéticos dos enrolamentos iguais como na Figura 5.76.

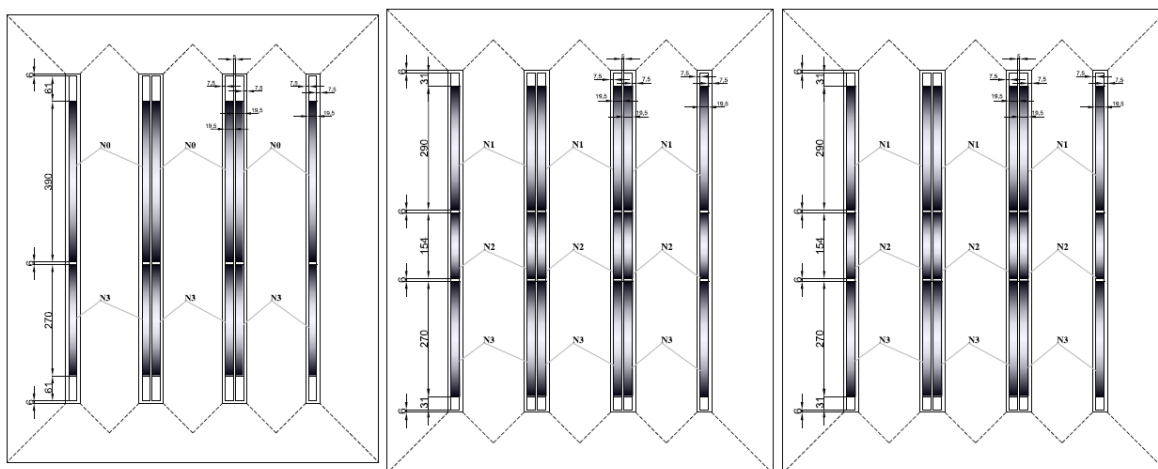


Figura 5.75 – Arquitetura dos enrolamentos do RNS699 usado na MODELS

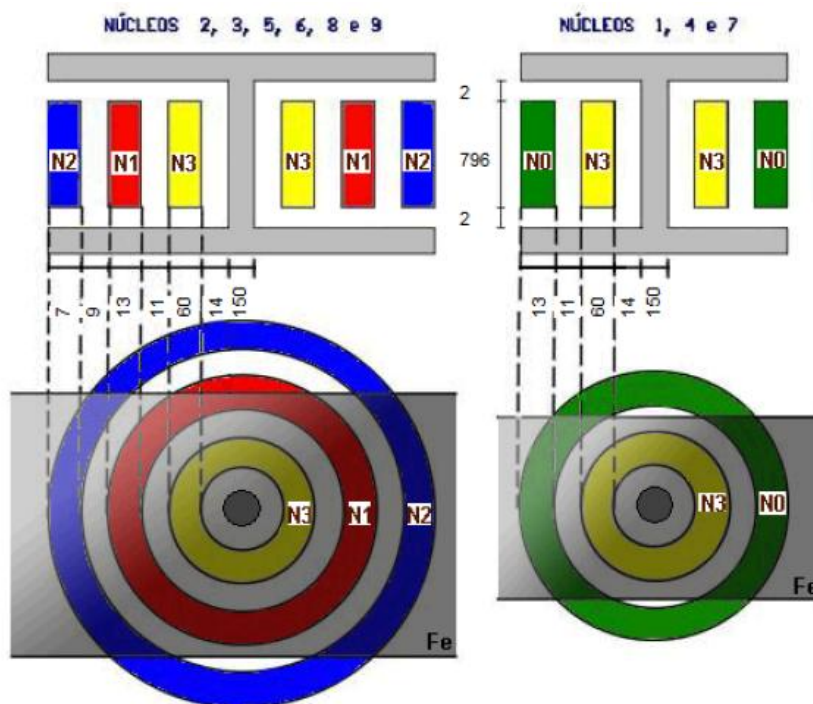


Figura 5.76 – Arquitetura dos enrolamentos do Reator usado no ATP

A estrutura magnética de reatores saturados foi concebido por Erich Friedlander segundo Magnata da Fonte (1997), onde a lei estipula que: Para obter-se a eliminação de todos harmônicos presentes em um dispositivos composto de n núcleos saturados com exceção daqueles de ordem $2kn \pm 1 \forall k \in N$, os enrolamentos do mesmo deverão estar disposto que as forças magnetomotrizes de excitação dos núcleos exibam uma mesma intensidade e defasagem de π/n radianos umas das outras, quando considera-se um ciclo completo de alimentação.

A análise de Fouier da simulação no ATP da corrente total na Fase A apresenta somente harmônios de ordem 17 e 19 como na Figura 5.77 conforme a teoria de Friendlander. Na análise as simulação na MODELS usando o modelo UMEC o mesmo apresenta outras ordens de harmônicos como na Figura 5.78, discordando da teoria de Friendlander. Analisando os resultados e comparando foram observados que os comprimentos magnéticos dos enrolamentos dos núcleos I, II e II representado pelo reator 6 enrolamentos na ligação estrela-Delta são de tamanhos diferentes ($N1+N3=660\text{mm}$) dos outros núcleos representados por 9 enrolamentos na ligação ZigZag-Delta ($N1+N2+N3=714\text{mm}$). Se colocarmos os comprimentos magnéticos representados em todos os nove núcleos nos mesmo tamanhos (660mm) a análise de Fourier do reator na MODELS apresenta ordens de harmônicos conforme a teoria de Friendlander como na Figura 5.79.

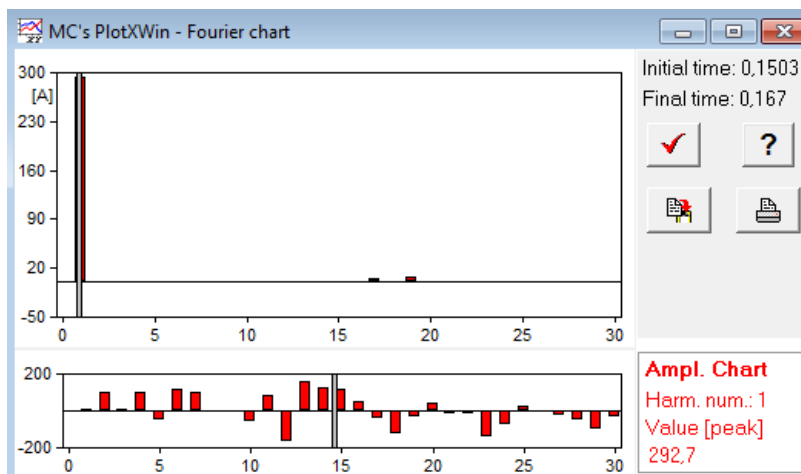


Figura 5.77 – Análise de Fourier da Corrente Total fase A do reator no ATP

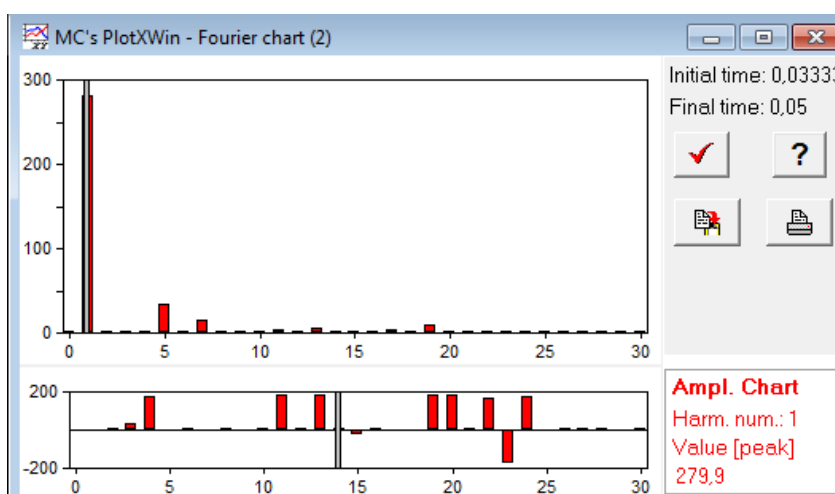


Figura 5.78 – Análise de Fourier da Corrente Total fase A do reator na MODELS

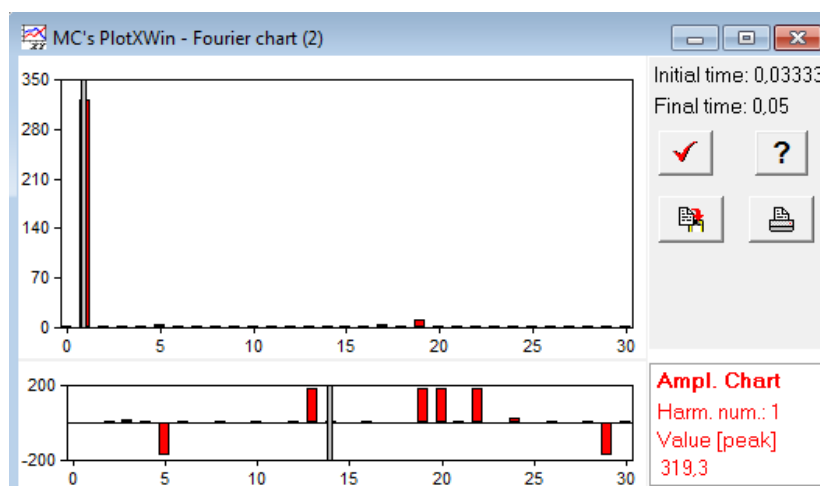


Figura 5.79 – Análise de Fourier da Corrente Total fase A do reator na MODELS considerando os mesmo comprimentos magnéticos nos 9 núcleos.

5.2.8 – Reator Naturalmente Saturado trifásico com 9 núcleos, 24 enrolamentos e 6 retornos com perdas histerese – RNS699H

No capítulo 4 é mostrado o algoritmo da determinar a curva B x H considerando o laço de histerese conforme a Figura 4.7. Acrescentando o algoritmo da curva B x H com laço no reator RNS699H. Comparando as correntes do primário do RNS699 sem perdas de histerese e o RNS699H com perdas histerese, a forma de onda da corrente Fase A do primário está representada na Figura 5.80. A comparação das formas de ondas das Correntes Fase A, B e C dos reatores com e sem perdas por histerese estão na Figura 5.81.

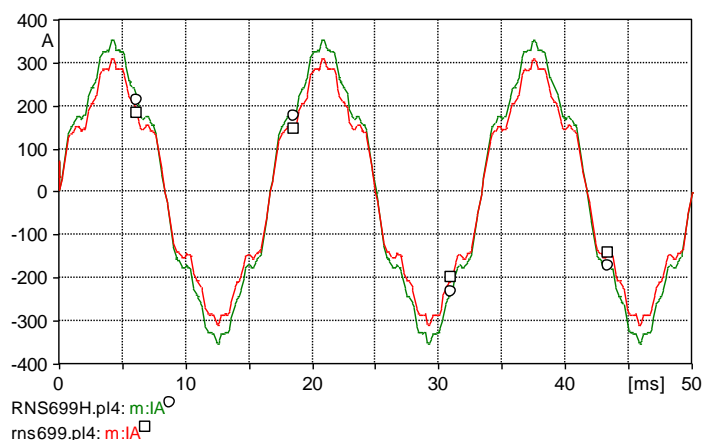


Figura 5.80 – Corrente de entrada do RNS699 na fase A (□) e no RNS699H com perdas por histerese Fase A (○).

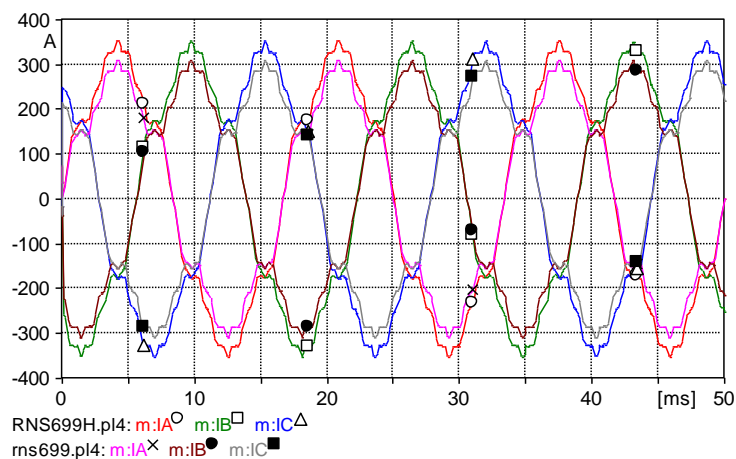


Figura 5.81 – Correntes no primário do RNS699 na fase A (×), B (●) e C (■) e no RNS699H Fase A (○), B (□) e C (Δ)

Os valores de picos das correntes simuladas acima estão contida na Tabela 5.19.

Tabela 5.19 – *Comparações das correntes do RNS699 e do RNS699H com perdas histerese*

	RNS699			RNS699H			DIFERENÇA		
	iA (A)	iB (A)	iC (A)	iA (A)	iB (A)	iC (A)	iA (A)	iB (A)	iC (A)
Primário	309,75	309,25	309,09	353,05	351,36	351,29	12,26%	11,98%	12,01%

Como esperado a corrente de entrada do reator com perdas histerese é maior que o reator sem as perdas histerese, pela liberdade da rotina MODELS podemos representar os resultados contendo as perdas por histerese.

CAPITULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 – Conclusão

O processo de compensação reativa é muito utilizado hoje para encontrar a conformidade e qualidade dos padrões da tensão no sistema de potência. Compensador estático é a junção de reatores saturados e capacitores tornando o sistema mais eficiente, pois o conjunto controla os fundamentos de tensão da rede elétrica.

O programa computacional de simulação de fenômenos transitórios eletromagnéticos de elementos não lineares como reatores saturados usados na maioria das empresas de energia é o software ATP (Alternative Transient Program). Sendo este um dos motivos para a prática dessa ferramenta computacional com o intuito de verificar as possíveis falhas eventuais de um sistema antes do mesmo ser implantado, de analisar, compreender e dimensionar o sistema de proteção da rede e até mesmo a economia do custo tornando indispensável à modelagem e simulação da rede. Os modelos matemáticos utilizados no software ATP para representar os reatores saturados são os modelos de aproximação linear por trechos em indutores não linear e o modelo de circuito equivalente Steinmetz em transformador saturável esses modelos foram apresentado no capítulo 3 desta dissertação.

O ATP além de ser uma ferramenta importante nas simulações de análise de sistema de energia, permite também que o usuário crie seus próprios modelos usando a rotina MODELS, uma ferramenta moderna de simulação utilizando algoritmos criados pelo os usuários. A linguagem MODELS permite que o usuário do ATP especifique e modifique o valor de parâmetros numéricos e/ou analógicos, para controlar a operação de componentes elétricos do sistema simulado, além de criação de novos modelos elétricos. Pela facilidade e liberdade do uso dessa linguagem o presente trabalho utiliza as ferramentas da MODELS no ATP para desenvolver novos modelos de reatores saturados com os objetivos de aperfeiçoar e melhorar as respostas dos modelos já existente do programa ATP. No ATP somente são plotados grandezas elétricas como tensão, corrente e potência, já na MODELS obtém-se nas saídas grandezas não só elétricas, mas também grandezas magnéticas importantes e essenciais para estudo dos reatores. Como, por exemplo, fluxo, permeância, intensidade do campo magnético, densidade magnética, curva $\lambda \times i$, curva $B \times H$ e muitas outras.

Como reatores e transformadores saturados usam material ferromagnético para direcionar e dar formas a campos magnéticos que atuam como meio de transferência e conversão de energia, a dissertação presente utiliza circuito magnético para modelar reatores e transformadores saturado. O conceito do circuito equivalente magnético unificado (UMEC) proposto foi implementado como

um equivalente Norton. Esse modelo é muito utilizado em programas transitório como EMTDC. O UMEC calcula o fluxo magnético no ramo em cada etapa de tempo que determina com precisão uma admitância equivalente que é adicionado com uma derivação entre os terminais do circuito equivalente de Norton para representar as perdas do núcleo magnético. Utilizando o modelo UMEC para explorar o circuito magnético dos reatores na linguagem MODELS do ATP com objetivo de desenvolver um modelo próprio para reatores saturado aperfeiçoando e melhorando resultados dos modelos já utilizados no ATP.

Primeiramente foi desenvolvido o modelo do indutor não linear pelo método de aproximação linear por trechos utilizando a curva $\lambda \times i$ em trechos lineares. Um estudo desse modelo foi concluído com a utilização de 9 trechos e atingindo resultados precisos quando comparados com o componente do ATP e TYPE 98 que é a representação do indutor não linear.

Para representar a saturação dos reatores no modelo UMEC foi utilizado o mesmo método do indutor não linear, no entanto, utilizando-se a curva $B \times H$ com 9 trechos. O modelo UMEC depende do circuito magnético do equipamento, por isso neste trabalho foram desenvolvido 4 tipos de características de reatores, dois monofásicos e dois trifásicos.

O primeiro foi RNS1 constituído por 1 núcleo, 1 enrolamento e 1 retorno, a sua comparação com o modelo no ATP foi com o elemento TYPE 98, mas o mesmo não apresenta perdas por histerese e perda de dispersão, sendo o modelo UMEC mais completo e preciso do que o modelo do ATP.

Depois foi desenvolvido o RNS2 que é composto por um transformador monofásico saturável constituído por 2 núcleo e 2 enrolamentos, a comparação desse modelo no ATP é com o componente TRANSFORMADOR SATURAVEL MONOFÁSICO, foram realizados em ambos os modelos, os teste básicos de um transformador, teste em vazio, em curto circuito e em plena carga, os resultados foram satisfatórios.

Para reatores naturalmente trifásicos foram desenvolvidos o RNS6Yd constituídos por 3 núcleos, 6 enrolamentos e 2 retornos ligação estrela-Delta, o RNS9Zigd constituído por 3 núcleos, 9 enrolamentos e 2 retornos ligação Zig-Delta, e o RNS9Zagd constituído por 3 núcleos, 9 enrolamentos e 2 retornos ligação Zag-Delta, todos projetado para consistir de FMMs de módulo idênticos e defasadas uma das outra de $\pi/9$ radianos. Agrupando o modelo RNS6Yd em paralelo com RNS9Zigd e RNS9Zagd formando o RNS699 afim de comparar a corrente total do reator naturalmente saturado desenvolvido e projetado pelo LDSP. A forma de onda da Corrente total do reator apresentou pequena diferença na forma de onda devido a arquitetura dos enrolamentos, na simulação do ATP os comprimentos magnéticos dos enrolamentos são iguais nos nove núcleos, onde nos projetos a diferença nos comprimentos magnéticos. Os resultados encontrados em todas as simulações foram muito satisfatórios. A liberdade do formato do programa na linguagem da MODELS pode ser inserido outras perdas e ainda tem vantagens de obter resultados na saída

grandezas magnéticas como fluxo, permeância, curva B x H as quais não são obtidos no modelo do ATP.

6.2 – Sugestões para trabalhos futuros

O presente trabalho adquiriu a familiarização com a rotina MODELS no ATP, dificuldades foram encontradas devido à ferramenta ser mais moderna ter poucas bibliotecas disponibilizadas. Como aplicação de reatores saturados são muitos utilizados para compensação de linhas de transmissão em grandes eixos de transferência de potência, esse tema na atualidade é muito estudado em busca de resultados mais eficientes.

Seguem algumas sugestões para trabalho futuros com a finalidade de aprimoramento para a utilização do modelo UMEC na rotina MODELS:

- Usar o modelo UMEC na rotina MODELS utilizando elemento Type 94 interagindo com sistema da rede elétrica. O Type 94 permite não haver defasagem entre a solução da rede e a MODELS, é representado diretamente no circuito como elemento não linear do EMTP.
- Usando rotina MODELS modelar os reatores para vários enrolamentos utilizando somente um algoritmo no programa, pois o presente trabalho foi desenvolvido modelos para todas as características dos reatores como o numero de enrolamento e núcleo.

6.3 – Publicações

- CARVALHO JR. M. A, SOUZA. Â. G, GOULART. C. B., “Desempenho de Auto-Reguladores Magnéticos em Sistemas de Distribuição de Energia”, Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica - CBQEE Junho 2013 Araxá MG.

APÊNDICE

7.1 – Cálculo da matriz inversa na linguagem MODELS

O calculo da matriz inversa pelo método de fatorização LU:

Considere um sistema linear:

$$A * x = b, \quad (7.1)$$

Onde:

A: é uma matriz quadrada e inversível.

$$A = LU, \quad (7.2)$$

Onde:

L: seja quadrada, da mesma ordem de A e triangular inferior unitária, inversível ;

U: seja quadrada, da mesma ordem de A e triangular superior, inversível .

A conversão da matriz A num sistema triangular é efetuada através da pré-multiplicação da matriz A por matrizes elementares M_k :

$$U = M_{n-1} \dots M_2 M_1 A, \quad (7.3)$$

$$L = M_1^{-1} M_2^{-1} \dots M_{n-1}^{-1}, \quad (7.4)$$

A k-ésima transformação M_k é introduzir zeros abaixo da diagonal da coluna k, subtraindo múltiplos da linha k das linhas k+1.....n. Na pratica, as matrizes de transformação M_k nunca são formados explicitamente. Os multiplicadores são computados e armazenados diretamente em L, e as transformações M_k são plicadas implicitamente. O Algoritmo 1 da fatorização LU está na Figura 7.1.

Algoritmo 1:

Entrada: A matriz A e escalar n

Saída: As matrizes L e U armazenadas em A

Para k = 1 a n-1

Para i = k +1 a n

$$\text{padding-left: 120px; } a_{ik} \leftarrow a_{ik} / a_{kk}$$

Para j = k + 1 a n

$$\text{padding-left: 120px; } a_{ij} \leftarrow a_{ij} - a_{ik} a_{kj}$$

Continue j

Continue i

Continue k

Figura 7.1 – Algoritmo 1: Fatorização LU

Solução do Sistema:

$$Ax = b, \quad (7.5)$$

$$A = LU, \quad (7.6)$$

$$LUx = b, \quad (7.7)$$

$$Ly = b, \quad (7.8)$$

$$y = Ux, \quad (7.9)$$

O algoritmo 2 da solução do sistema está na Figura 7.2.

Algoritmo 2:

Entrada: A matriz A, o vetor b e o escalar n.
Saída: A solução x armazenada no vetor b.

Para i = 1 a n

Para j = 1 a i - 1

$b_i \leftarrow b_i - l_{ij}b_j$

Continue j

Continue i

Para i = n a 1

Para j = i + 1 a n

$b_i \leftarrow b_i - u_{ij}b_j$

Continue j

$b_i \leftarrow b_i / u_{ii}$

Continue k

Figura 7.2 – Algoritmo 2: Solução do sistema

Uma matriz quadrada A, n x n, é invertível se existe uma matriz B, n x n tal que:

$$A * B = I, \quad (7.10)$$

I é a matriz Identidade;

B é matriz inversa de A.

Renomeando o sistema acima $A*x=b$ como: $B = x$ e $I = b$, obtém a matriz inversa.

O calculo da matriz inversa na MODELS do ATP é obtido utilizando os algoritmos 1 e 2 descritos acima, porem a linguagem da MODELS tem uma desvantagem ser unidirecional sendo assim o calculo deverá ser feito como vetores.

A rotina para calcular a matriz inversa (4x4) na linguagem MODELS é:

```
MODEL LU4
INPUT v1
DATA n
VAR k
i
j
a11
a12
a13
a14
a21
a22
a23
a24
a31
a32
a33
a34
a41
a42
a43
a44
b11
b21
b31
b41
b12
b22
b32
b42
b13
b23
b33
b43
b14
b24
b34
b44
OUTPUT i
INIT
i:=0
k:=0
j:=0
ENDINIT
EXEC
j:=n+k+i
a11:=2
a12:=1
a13:=1
a14:=0
a21:=4
a22:=3
a23:=3
a24:=1
a31:=8
a32:=7
a33:=9
a34:=5
a41:=6
a42:=7
a43:=9
a44:=8
b11:=1
b21:=0
b31:=0
b41:=0
b12:=0
```

```

b22:=1
b32:=0
b42:=0
b13:=0
b23:=0
b33:=1
b43:=0
b14:=0
b24:=0
b34:=0
b44:=1
a21:=a21/a11
a22:=a22-a21*a12
a23:=a23-a21*a13
a24:=a24-a21*a14
a31:=a31/a11
a32:=a32-a31*a12
a33:=a33-a31*a13
a34:=a34-a31*a14
a41:=a41/a11
a42:=a42-a41*a12
a43:=a43-a41*a13
a44:=a44-a41*a14
a32:=a32/a22
a33:=a33-a32*a23
a34:=a34-a32*a24
a42:=a42/a22
a43:=a43-a42*a23
a44:=a44-a42*a24
a43:=a43/a33
a44:=a44-a43*a34
b21:=b21-a21*b11
b31:=b31-a31*b11
b31:=b31-a32*b21
b41:=b41-a41*b11
b41:=b41-a42*b21
b41:=b41-a43*b31
b41:=b41/a44
b31:=b31-a34*b41
b31:=b31/a33
b21:=b21-a23*b31
b21:=b21-a24*b41
b21:=b21/a22
b11:=b11-a12*b21
b11:=b11-a13*b31
b11:=b11-a14*b41
b11:=b11/a11
b22:=b22-a21*b12
b32:=b32-a31*b12
b32:=b32-a32*b22
b42:=b42-a41*b12
b42:=b42-a42*b22
b42:=b42-a43*b32
b42:=b42/a44
b32:=b32-a34*b42
b32:=b32/a33
b22:=b22-a23*b32
b22:=b22-a24*b42
b22:=b22/a22
b12:=b12-a12*b22
b12:=b12-a13*b32
b12:=b12-a14*b42
b12:=b12/a11
b23:=b23-a21*b13
b33:=b33-a31*b13
b33:=b33-a32*b23
b43:=b43-a41*b13

```



```
b43:=b43-a42*b23
b43:=b43-a43*b33
b43:=b43/a44
b33:=b33-a34*b43
b33:=b33/a33
b23:=b23-a23*b33
b23:=b23-a24*b43
b23:=b23/a22
b13:=b13-a12*b23
b13:=b13-a13*b33
b13:=b13-a14*b43
b13:=b13/a11
b24:=b24-a21*b14
b34:=b34-a31*b14
b34:=b34-a32*b24
b44:=b44-a41*b14
b44:=b44-a42*b24
b44:=b44-a43*b34
b44:=b44/a44
b34:=b34-a34*b44
b34:=b34/a33
b24:=b24-a23*b34
b24:=b24-a24*b44
b24:=b24/a22
b14:=b14-a12*b24
b14:=b14-a13*b34
b14:=b14-a14*b44
b14:=b14/a11
i:=v1/n
ENDEXEC
ENDMODEL
RECORD
LU4.b11 AS b11
LU4.b12 AS b12
LU4.b13 AS b13
LU4.b14 AS b14
LU4.b21 AS b21
LU4.b22 AS b22
LU4.b23 AS b23
LU4.b24 AS b24
LU4.b31 AS b31
LU4.b32 AS b32
LU4.b33 AS b33
LU4.b34 AS b34
LU4.b41 AS b41
LU4.b42 AS b42
LU4.b43 AS b43
LU4.b44 AS b44
```

ANEXOS

8.1 - Aplicação do Método de Integração Trapezoidal em sistema Elétricos

O cálculo computacional de transitórios eletromagnéticos no domínio do tempo tem como pressuposto a discretização das equações diferenciais dos vários elementos de circuito. Assim, as regras de integração desempenham um papel fundamental na formulação de qualquer programa de transitórios. O comportamento dessas regras influencia a precisão e a estabilidade das soluções computacionais.

Os processos numéricos de integração dentro de um intervalo definido, o que corresponde a área sob a curva que define a função $f(x)$ no intervalo X_n a X_{n+1} , como na figura 8.1.

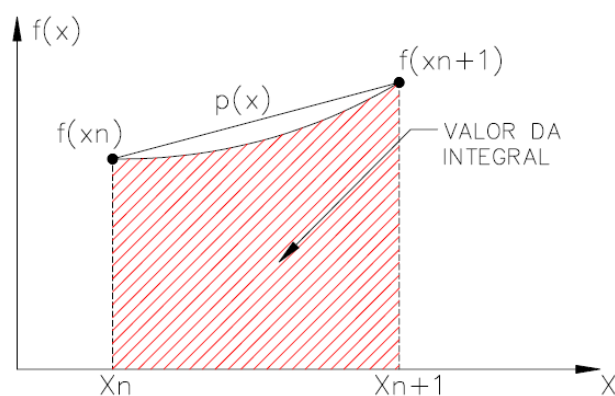


Figura 8.1 – Aplicação do método de integração trapezoidal

A área definida do trapézio da figura 8.1 é o valor da integral, tem-se:

$$I = \int_{x_n}^{x_{n+1}} f(x) dx = \frac{\Delta x}{2} [f(x_{n+1}) + f(x_n)], \quad (8.1)$$

Considerando a equação diferencial descrita na equação 8.2:

$$\frac{dY}{dx} = f(x, Y(x)), \quad (8.2)$$

Integrando a equação 8.2:

$$Y(x_{n+1}) = Y(x_n) + \int_{x_n}^{x_{n+1}} f(x, Y(x)) dx, \quad (8.3)$$

Aplicando-se a regra de integração trapezoidal definida na equação 8.1 obtém-se:

$$Y(x_{n+1}) = Y(x_n) + \frac{\Delta x}{2} [f(x_n, Y(x_n)) + f(x_{n+1}, Y(x_{n+1}))], \quad (8.4)$$

Adotando-se os seguintes valores:

$$Y_{n+1} = Y(x_{n+1}), \quad (8.5)$$

$$Y_n = Y(x_n), \quad (8.6)$$

Substituindo estes valores na equação 8.4 tem-se

$$Y_{n+1} = Y_n + \frac{\Delta x}{2} [f(x_n, Y_n) + f(x_{n+1}, Y_{n+1})], \quad (8.7)$$

A equação 8.7 caracteriza o método trapezoidal.

Considerando o ramo com uma indutância como na Figura 8.2:

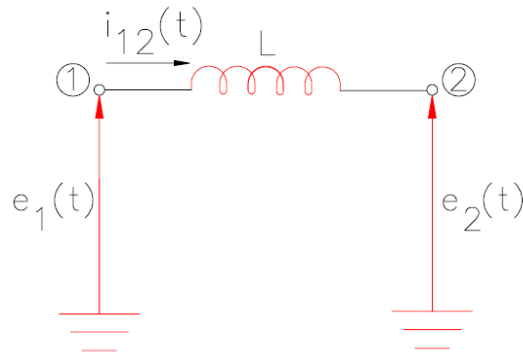


Figura 8.2 – Circuito elétrico considerando uma indutância

A equação diferencial que descreve o comportamento físico deste ramo indicado na figura 8.2 é:

$$e_1(t) - e_2(t) = L \frac{di_{12}(t)}{dt}, \quad (8.8)$$

Explicitando o termo em derivada e integrando no intervalo $t-\Delta t$ a t , obtém-se:

$$i_{12}(t) = i_{12}(t - \Delta t) + \frac{1}{L} \int_{t-\Delta t}^t [e_1(t) - e_2(t)] dt, \quad (8.9)$$

Aplicando-se o método trapezoidal em 8.9 obtém-se:

$$i_{12}(t) = i_{12}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2L} [e_1(t) - e_2(t) + e_1(t - \Delta t) - e_2(t - \Delta t)], \quad (8.10)$$

Dividindo a equação em duas partes:

$$i_{12}(t) = \frac{\Delta t}{2L} [e_1(t) - e_2(t)] + I_{12}(t - \Delta t), \quad (8.11)$$

Onde:

$$I_{12}(t - \Delta t) = i_{12}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2L} [e_1(t - \Delta t) + e_2(t - \Delta t)], \quad (8.12)$$

Fisicamente estas equações podem representar o circuito mostrado na figura 8.3.

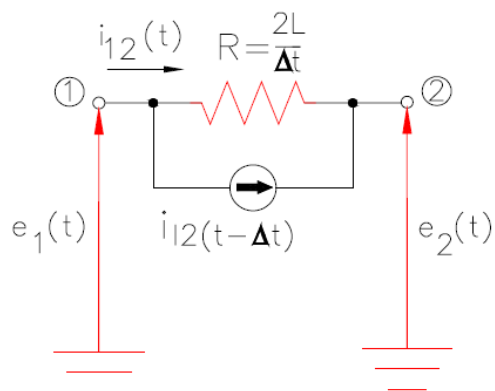


Figura 8.3 – Circuito equivalente da figura 8.2.

Portando, transforma-se uma equação diferencial em uma equação algébrica. A indutância passou a ser representada por um resistência equivalente e uma fonte de corrente em paralelo que contém a historia passada, pois a cada novo intervalo de tempo, a fonte contribui com um valor correspondente ao intervalo anterior.[17]

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MAGNATA DA FONTE, L.A. *Desenvolvimento de Reatores com Saturação natural para aplicação em Sistema de Potência*. Recife 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade federal de Pernambuco – UFPE.
- [2] VERNEY, L. H. Costa. *Desempenho da Proteção Diferencial em Transformadores de Potência Perante Condições Especiais de Operação*. Florianópolis 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina.
- [3] ELECTROMAGNETIC TRANSIENTS PROGRAM (EMTP) Rule Book. Bonneville Power Administration, Portland, Oregon, September 1980.
- [4] ENRIGHT. WADE G. *Transformer models for electromagnetic transient studies with particular reference to HVdc transmission*. February 1996. Thesis (Doctoral Electrical and Electronic Engineering) – University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- [5] RULE BOOK, 1987 - ATP – *Alternatives Transients Program*.
- [6] PEREIRA M. P. e FONSECA C. S. “*Análise transitória de Sistema de Controle e modelagem de Sistemas não Convencionais no Programa ATP*”, XIII SNPTEE 1995. Camboriú, Brasil.
- [7] SARCINELLI, Luz G. *Introdução ao uso do programa ATP/EMTP*. Furnas Centrais Elétricas. Dezembro 2003. Rio de Janeiro. Brasil.
- [8] VASCONCELLOS A. B. e OLIVEIRA J. C. *Análise operacional de compensadores estáticos com reator a núcleo saturado quanto a produção e compensação de corrente harmônicas*, Induscon Agosto 2008, Poços de caldas, Brasil.
- [9] ARAÚJO A. E. A. *Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistema de Energia*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.
- [10] CHAVES, M. L. R. *Modelagem Transformadores e Reatores com Entreferro*. Uberlândia 2012. Universidade Federal de Uberlândia.

- [11] FITZGERALD, A. E., UMANS, Stephen D. E KINGSLEY JR., Charles. *Máquinas Elétricas*. Editora: Artmed 6ª Edição – 2006.
- [12] MONTEIRO, Thiago Costa. *Proposta de Modelo e Método para Determinação dos parâmetros de transformadores Operando em Saturação*. São Paulo 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da universidade de São Paulo.
- [13] ZANETTA JUNIOR L.C. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistema de Potência*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo – Edusp, 2003.
- [14] NAKAGOMI R. M. e SENGER E. C. *Desenvolvimento e Implementação de Dispositivos de Proteção no ATP*. VIIISTPC Julho 2005, Rio de Janeiro, Brasil.
- [15] PIMENTA D. G. e AMON FILHO J. *Estudos de Transitórios de abertura de Disjuntores com a Rotina MODELS*. Furnas Centrais Elétricas, Rio de Janeiro, Brasil.
- [16] CORREIA DE BARROS, M.T., ALMEIDA M.E e DUBÉ L. “*Interfacing with EMTP a General-Purpose Transmission Line Model*.” International Conference on Power Systems Transients. Setembro 1995. Lisboa Portugal.
- [17] COGO, J. R. e OLIVEIRA, A.R.C. “*Aplicação do Método de Integração Trapezoidal em Sistemas Elétricos*.” EFEI 1983. Itajubá Brasil.