

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

“Um Método para Detecção e Classificação de Curtos-Circuitos em Redes de Distribuição de Energia Elétrica Baseado na Transformada de Fourier e em Redes Neurais Artificiais”

**Élito dos Reis Matos**

**Orientador:** Prof. Dr. Jozué Vieira Filho

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

Área de Conhecimento: Automação.

Ilha Solteira – SP  
Agosto de 2009

## FICHA CATALOGRÁFICA

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

- M433m Matos, Élito dos Reis.  
Um método para detecção e classificação de curtos-circuitos em redes de distribuição de energia elétrica baseado na transformada de Fourier e em redes neurais artificiais / Élito dos Reis Matos. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2009. 115 f. : il.
- Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2009
- Orientador: Jozué Vieira Filho  
Bibliografia: p. 97-101
1. Curtos-circuitos - Classificação.
  2. Redes neurais (Computação).
  3. Fourier, Transformações de.



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO:** Um método para Detecção e Classificação de Curtos-Circuitos em Redes de Distribuição de Energia Elétrica Baseado na Transformada de Fourier e em Redes Neurais Artificiais

**AUTOR:** ÉLITO DOS REIS MATOS  
**ORIENTADOR:** Prof. Dr. JOZUE VIEIRA FILHO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA ELÉTRICA, Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. JOZUE VIEIRA FILHO  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Prof. Dr. CARLOS ROBERTO MINUSSI  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Prof. Dr. WALMIR DE FREITAS FILHO  
Departamento de Sistemas de Energia Elétrica / Universidade Estadual de Campinas

Data da realização: 28 de agosto de 2009.

*Aos meus pais José Elito Rocha Matos e  
Maria Socorro dos Reis Matos, à minha  
esposa Ilma André dos Santos Matos e às  
minhas irmãs.*

**Dedico**

*Ao meu orientador, Jozué Vieira Filho, pelo  
apoio e incentivo constante, sem os quais a  
concretização deste trabalho seria  
impossível.*

**Ofereço**

## ***Agradecimentos***

*Agradeço a Deus pelo precioso dom da vida e pelas ricas oportunidades que me concedeu ao longo dessa jornada. Fico surpreso e grato ao olhar para trás e perceber quantos pequenos milagres, disfarçados de coincidências, me trouxeram carinhosamente a este lugar.*

*Agradeço a minha amada esposa, Ilma André dos Santos Matos, cujo apoio e compreensão foram absolutamente indispensáveis para a conclusão deste trabalho.*

*Agradeço aos meus amados pais José Elito Rocha Matos e Maria Socorro dos Reis Matos, sem que possa transcrever aqui em palavras a gratidão que sinto por tudo que fizeram por mim.*

*Agradeço as minhas irmãs Elissandra Matos Campos e Élide dos Reis Matos por iluminarem meu caminho com seu amor e carinho. Estão comigo em todos os lugares, em meu coração.*

*Agradeço ao meu cunhado e grande amigo Alexandre Lázaro Campos, apesar das perguntas difíceis que quase nunca soube responder. Você é um exemplo pra mim.*

*Agradeço a todos os meus familiares, amigos e colegas. Sem vocês simplesmente a vida não teria sentido.*

*Agradeço especialmente ao meu amigo e orientador, Jozué Vieira Filho. Por acreditar em mim mesmo nos momentos em que eu não acreditava, meus mais sinceros agradecimentos.*

*Agradeço ao colega André do Amaral Penteado Bísvaro, cujo trabalho com o software ATP-EMTP constitui a base para as simulações utilizadas em meu projeto. Sem sua generosa contribuição, este trabalho certamente não teria sido possível.*

*"HUMILDEMENTE ROGAMOS A ELE QUE NOS LIVRASSE DE NOSSAS IMPERFEIÇÕES"*

**7º Passo - AA**

## RESUMO

Neste trabalho apresenta-se uma Metodologia para Detecção e Classificação de Curtos-Circuitos em alimentadores de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica fundamentada na análise de registros oscilográficos através da DFT (*Discrete Fourier Transform*) e de RNAs (*Redes Neurais Artificiais*). Sua aplicação pressupõe a disponibilidade de registros de oscilografia digital das correntes nas três fases do alimentador, monitoradas apenas na saída da subestação. A caracterização de cada tipo de curto-circuito é obtida mediante a análise do comportamento dinâmico das correntes de fase durante o período transitório das faltas e a detecção e classificação dos curtos-circuitos são efetuadas por meio de um banco de RNAs acíclicas, do tipo *perceptrons*, de múltiplas camadas. Um modelo de um alimentador real de Sistema de Distribuição de grande porte, composto por 836 barras, foi utilizado na obtenção dos dados referentes aos curtos-circuitos, com simulações via *software* ATP-EMTP (*Alternative Transients Program - Electromagnetic Transients Program*). O método foi implementado e testado utilizando-se o *software* MATLAB<sup>®</sup>. Como resultado tem-se uma metodologia de formulação simples que apresenta bom desempenho, é de fácil implementação, apresenta baixa carga computacional e gera resultados altamente satisfatórios.

**Palavras-Chave:** Detecção e Classificação de Curtos-Circuitos, Redes Neurais Artificiais, Transformada Discreta de Fourier.

## ABSTRACT

This work proposes a methodology for Detection and Classification of Short-Circuits in Distribution Electric Power feeders, based on the analysis of oscillograph records through the application of DFT (*Discrete Fourier Transform*) and ANNs (*Artificial Neural Networks*). Its application requires the availability of digital oscillograph records of the currents in the three phases of the feeder, only monitored at the output of the substation. The characterization of each type of short-circuit is obtained by means of analysis of the dynamic behavior of the phase currents during the transitory period. The detection and classification of short-circuits is performed by a bank of acyclic ANNs, of type multilayers perceptrons. A real feeder model of a large distribution power system, composed of 836 buses, was used to obtain data relating to short-circuits, simulated via ATP-EMTP (*Alternative Transients Program - Electromagnetic Transients Program*) software. The method was implemented and tested using MATLAB<sup>®</sup>. As a conclusion, the proposed method is simple to be implemented, presents low computational load and generates good results.

**Keywords:** Short-Circuits Detection and Classification, Neurons Artificial Networks, Discrete Fourier Transform.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA. ADAPTADO DE <i>ELECTRIC POWER ENGINEERING HANDBOOK</i> (GRISBY 2001, CRC PRESS). -----	19
FIGURA 2: ARRANJOS TÍPICOS DOS CIRCUITOS DO SISTEMA DE SUBTRANSMISSÃO. ADAPTADO DE <i>ELECTRIC POWER DISTRIBUTION EQUIPMENT AND SYSTEMS</i> (SHORT, 2006). -----	20
FIGURA 3: FONTE IDEAL DE TENSÃO SENOIDAL CONECTADA A UMA LINHA MONOFÁSICA. -----	25
FIGURA 4: ZONAS DE PROTEÇÃO.-----	31
FIGURA 5: COORDENAÇÃO DA PROTEÇÃO POR RELÉS DE SOBRECORRENTE COM CURVAS DE ATUAÇÃO DE TEMPO INVERSO. -----	33
FIGURA 6: CIRCUITO SIMPLIFICADO DE PROTEÇÃO DE TRANSFORMADOR. -----	34
FIGURA 7: DIAGRAMA UNIFILAR DE PROTEÇÃO DE TRANSFORMADOR. -----	35
FIGURA 8: DETECÇÃO DE CORRENTE A TERRA. (A) DETECÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS NÃO-ATERRADOS UTILIZANDO TC DE SEQUÊNCIA ZERO. (B) RELÉ DE SOBRETENSÃO 59G PARA DETECÇÃO DE FALTA A TERRA. (C) MÉTODO DE PROTEÇÃO DE FALTA A TERRA COM TRÊS TCS.-----	36
FIGURA 9: PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE DE ALIMENTADOR DE DISTRIBUIÇÃO. -----	38
FIGURA 10: ESTRUTURA FUNCIONAL DE UM SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE SUBESTAÇÃO. EXTRAÍDO DE <i>POWER SYSTEMS PROTECTION, POWER QUALITY AND SUBSTATION AUTOMATION</i> .-----	42
FIGURA 11: ILUSTRAÇÃO DE TELA DE UM MONITOR DE UM SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE SUBESTAÇÕES. -----	44
FIGURA 12: PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS – EXTRAÍDO DE <i>DIGITAL SIGNAL PROCESSING - FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS</i> (TAN, 2008).-----	50
FIGURA 13: FORMA DE ONDA PERIÓDICA AMOSTRADA. NESTE EXEMPLO FORAM TOMADAS 8 AMOSTRAS (INDICADAS POR PONTOS SOBRE A CURVA) EM UM PERÍODO. ADAPTADO DE <i>FAST TRANSFORMS ALGORITHMS, ANALYSES, APPLICATIONS</i> (ELLIOTT; RAO, 1982). -----	51
FIGURA 14: MODELO DE UM NEURÔNIO. ADAPTADO DE <i>NEURAL NETWORK TOOLBOX FOR USE WITH MATLAB®</i> (DEMUTH; BEALE, 1998). -----	56
FIGURA 15: FUNÇÃO DE LIMIAR (OU DE <i>HEAVISIDE</i> ).-----	56
FIGURA 16: FUNÇÃO LINEAR POR PARTES. -----	57
FIGURA 17: FUNÇÃO SIGMOIDE, PARA 3 DIFERENTES VALORES DE A.-----	57
FIGURA 18: FUNÇÃO TANGENTE HIPERBÓLICA, PARA TRÊS DIFERENTES VALORES DE A. -----	58
FIGURA 19: DUAS CLASSES DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS. A) REDE ACÍCLICA DE MÚLTIPLAS CAMADAS. B) REDE RECORRENTE. -----	59
FIGURA 20: APRENDIZADO SUPERVISIONADO.-----	60
FIGURA 21: CLASSIFICADOR DE PADRÕES. BASEADO EM <i>NEURAL NETWORKS - A COMPREHENSIVE FOUNDATION</i> . -61	
FIGURA 22: GRAFO DE FLUXO DE SINAL RESSALTANDO OS DETALHES DO NEURÔNIO DE SAÍDA J. REPRODUZIDO DE <i>NEURAL NETWORKS - A COMPREHENSIVE FOUNDATION</i> . -----	62
FIGURA 23: DETALHES DO NEURÔNIO DE SAÍDA K, CONECTADO AO NEURÔNIO OCULTO J. REPRODUZIDO DE <i>NEURAL NETWORKS - A COMPREHENSIVE FOUNDATION</i> . -----	64
FIGURA 24: DIAGRAMA DE BLOCOS FUNCIONAL DO SISTEMA DE DIAGNÓSTICO DE FALTAS PROPOSTO. -----	68

FIGURA 25: TOPOLOGIA DO ALIMENTADOR UTILIZADO COMO MODELO. APENAS OS CAMINHOS TRAÇADOS PELA REDE PRIMÁRIA ESTÃO INDICADOS. ESTE ALIMENTADOR É CARACTERIZADO POR UM ELEVADO NÚMERO DE RAMAIS E SUB-RAMAIS.-----	71
FIGURA 26: AS AMOSTRAS DAS CORRENTES NAS TRÊS FASES, TOMADAS NO INTERVALO DE TEMPO $T_d$ INDICADO PELAS LINHAS PONTILHADAS, CONSTITUEM, PARA UM DADO INSTANTE, A ENTRADA DO SISTEMA DE DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS. -----	73
FIGURA 27: OPERAÇÃO DO BLOCO DE PRÉ-PROCESSAMENTO. UM VETOR DE CARACTERÍSTICAS $C$ É OBTIDO A PARTIR DO VETOR DE ENTRADA $E$ . OS TRÊS PRIMEIROS ELEMENTOS DO ESPECTRO DE AMPLITUDE CORRESPONDEM AOS MÓDULOS DOS COMPONENTES DE SEQUÊNCIA ZERO DAS SEQUÊNCIAS DE CORRENTES CORRESPONDENTES AO 1º, 3º E 5º HARMÔNICOS. -----	77
FIGURA 28: DEFINIÇÃO DO TAMANHO DA JANELA, EM NÚMERO DE PERÍODOS DO COMPONENTE FUNDAMENTAL, E DO NÚMERO DE AMOSTRAS QUE DEVEM SER TOMADAS ANTES DA ATUALIZAÇÃO DA JANELA. -----	81
FIGURA 29: SELEÇÃO DAS BARRAS QUE DEVERÃO FORMAR O CONJUNTO DE TREINAMENTO DAS REDES. -----	81
FIGURA 30: FORMAÇÃO DO VETOR DE CARACTERÍSTICAS. NESTE EXEMPLO SERÃO EMPREGADOS OS COMPONENTES DE SEQUÊNCIA POSITIVA E NEGATIVA DAS SEQUÊNCIAS DE FASORES REPRESENTATIVOS DO 2º, 3º E 5º COMPONENTES HARMÔNICOS DAS CORRENTES. -----	82
FIGURA 31: VALOR MÉDIO DO ESPECTRO DE AMPLITUDE DOS COMPONENTES SEQUENCIAIS SELECIONADOS. -----	83
FIGURA 32: ESCOLHA DA ARQUITETURA DAS REDES UTILIZADAS NA DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DAS FALTAS.--	84
FIGURA 33: ESCOLHA DAS BARRAS UTILIZADAS NA VALIDAÇÃO DO TREINAMENTO. -----	85
FIGURA 34: FALTA MONOFÁSICA FASE A SIMULADA NA BARRA 28. -----	86
FIGURA 35: PARTE DE UM POSSÍVEL PÓS-PROCESSADOR, IMPLEMENTADO ATRAVÉS DE PORTAS LÓGICAS. SOMENTE A COMPARAÇÃO ENTRE OS BITS QUE REPRESENTAM FALTAS ENVOLVENDO A FASE A ESTÁ INDICADA. -----	87
FIGURA 36: SAÍDA DO SISTEMA $SDF\_1$ PARA UMA FALTA MONOFÁSICA FASE A SIMULADA NA BARRA 836, COM RESISTÊNCIA DE FALTA DE $400 \Omega$ . -----	90
FIGURA 37: DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA ATRAVÉS DO EMPREGO DE UM NÚMERO MAIOR DE COMPONENTES HARMÔNICOS. -----	91

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: ESTADO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO ANTES DA APLICAÇÃO DAS FALTAS. -----	70
TABELA 2: TEMPO NECESSÁRIO PARA O CÁLCULO DO COMPONENTE FUNDAMENTAL DA CORRENTE PARA TRÊS DIFERENTES ALGORITMOS. -----	75
TABELA 3: SAÍDAS GERADAS PELA REDE RNA_2, ASSOCIADAS ÀS RESPECTIVAS FALTAS. -----	78
TABELA 4: SAÍDAS GERADAS PELAS REDES RNA_3 E RNA_4, ASSOCIADAS ÀS RESPECTIVAS FASES. -----	79
TABELA 5: PARÂMETROS UTILIZADOS NO PROJETO DE 5 DIFERENTES SISTEMAS DE DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS. -----	88
TABELA 6: ARQUITETURA DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS EMPREGADAS NOS SISTEMAS INDICADOS NA TABELA 5. -----	89
TABELA 7: TEMPO DE RESPOSTA DOS SISTEMAS DE DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS APRESENTADOS NAS TABELAS 5 E 6, PARA UM FALTA MONOFÁSICA APLICADA À FASE C DA BARRA 477. -----	92
TABELA 8: DADOS DO ALIMENTADOR REAL UTILIZADO COMO MODELO. -----	102

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>2. SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA</b>	<b>19</b>
2.1. Aspectos Gerais dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica no Brasil	19
2.2. Subestações de Distribuição	21
2.2.1. <i>Faltas e Curtos-Circuitos</i>	22
2.2.1.1. Natureza das Correntes de Curto-Circuito	25
2.2.2. <i>Equipamentos de Manobra e Proteção</i>	27
2.2.2.1. Chaves Seccionadoras	28
2.2.2.2. Disjuntores	28
2.2.2.3. Religadores Automáticos	28
2.2.2.4. Chave de Aterramento de Alta Velocidade	29
2.2.2.5. Fusíveis	29
2.2.2.6. Relés de Proteção	29
2.3. Proteção das Subestações e Alimentadores de Distribuição	30
2.3.1. <i>Proteção dos Transformadores de Potência</i>	34
2.3.2. <i>Proteção de Barramento</i>	37
2.3.3. <i>Proteção de alimentador</i>	38
2.3.4. <i>Aterramento</i>	38
2.3.5. <i>Serviços Auxiliares</i>	39
2.4. Automação de Subestações	39
2.4.1. <i>Evolução dos Sistemas de Automação de Subestações</i>	39
2.4.2. <i>Introdução aos Sistemas de Automação de Subestações</i>	41
2.4.3. <i>Sistemas SCADA (Supervisory, Control and Data Acquisition)</i>	44
<b>3. APLICAÇÃO DA DFT NA ANÁLISE DE SINAIS ELÉTRICOS</b>	<b>46</b>
3.1. Representação Fasorial de Sinais Contínuos	46
3.2. Representação Fasorial de Sinais Discretos	49
<b>4. INTRODUÇÃO ÀS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS</b>	<b>54</b>
4.1. Neurônios Artificiais	55
4.2. Arquiteturas de Rede	58
4.3. Aprendizado	60
4.3.1. <i>Perceptrons de Múltiplas Camadas</i>	61
4.3.1.1. Neurônios da camada de saída	62
4.3.1.2. Neurônios Ocultos	63
4.3.1.3. Resilient Backpropagation	66

<b>5. METODOLOGIA PROPOSTA DE DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE CURTOS-CIRCUITOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA</b>	<b>68</b>
5.1. Descrição dos Blocos Funcionais	72
5.1.1. <i>Bloco de Pré-Processamento</i>	72
5.1.2. <i>Banco de Redes Neurais Artificiais</i>	78
5.2. Implementação do Sistema de Detecção e Classificação de Faltas Proposto	80
5.2.1. <i>Bloco de Pós-Processamento</i>	86
<b>6. RESULTADOS</b>	<b>88</b>
<b>7. CONCLUSÕES</b>	<b>94</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>97</b>
<b>9. APÊNDICE – DADOS DO ALIMENTADOR</b>	<b>102</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O modelo institucional do Setor Elétrico Brasileiro sofreu profundas modificações nos últimos anos (ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL, 2008). Em dezembro de 1996, a Lei nº 9.427 instituiu a ANEEL (*Agência Nacional de Energia Elétrica*) e deu início ao processo de privatização das companhias operadoras do setor elétrico nacional. Em março de 2004, a Lei nº 10.848 instituiu o Novo Modelo do Setor Elétrico Brasileiro, tendo como objetivos garantir a segurança no suprimento, o controle e a adequação tarifária, e ainda promover a inserção social. Recentemente, em 16 de dezembro de 2008, foi aprovado pela ANEEL o PRODIST (*Procedimentos de Distribuição*), o qual consiste em um conjunto de normas que visam regulamentar o relacionamento entre as distribuidoras de energia elétrica e os demais agentes conectados aos sistemas de distribuição. Estas transformações estão ocorrendo em resposta a diversos fatores, tais como o aumento da demanda, o avanço tecnológico e as novas exigências do mercado consumidor de energia.

O PRODIST, em seu módulo 8, estabelece alguns indicadores e padrões de qualidade que visam fornecer à ANEEL parâmetros eficientes de avaliação do desempenho das distribuidoras em relação à qualidade do serviço prestado. Um importante indicador, denominado TMAE (*Tempo Médio de Atendimento a Emergências*), avalia o tempo total necessário ao atendimento de ocorrências emergenciais, sendo dado pela soma de três outros indicadores: TMP (*Tempo Médio de Preparação*), TMD (*Tempo Médio de Deslocamento*) e TME (*Tempo Médio de Execução*). Os dois primeiros, TMP e TMD, aferem o tempo total necessário para a localização em campo, pelas equipes de manutenção, do ponto de incidência de uma falta ou defeito. A estes indicadores acrescenta-se ainda o PNIE (*Percentual do Número de Ocorrências Emergenciais com Interrupção de Energia*). A apuração destes indicadores é mensal, sendo que cada distribuidora deve enviar à ANEEL, até o último dia útil do mês subsequente ao período de apuração, os valores mensais apurados.

Para avaliar a continuidade do serviço de fornecimento de energia quanto a frequência e duração das interrupções, foram estabelecidos os seguintes indicadores: DEC (*Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora*), FEC (*Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora*), DIC (*Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora*), FIC (*Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora*) e DMIC (*Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora*). Os dois primeiros indicadores, DEC e FEC, denominados indicadores de continuidade de conjunto, são os mais importantes. No cálculo de todos os indicadores são

consideradas apenas as interrupções com duração superior a 3 minutos, conforme estabelecido no módulo 8 do PRODIST. Também não são consideradas as interrupções que ocorrem em dias críticos, sendo considerados críticos os dias em que o número de ocorrências emergenciais ultrapassa a média acrescida de três desvios padrões dos valores diários. O descumprimento das metas previstas para estes índices, com apuração mensal, trimestral e anual, resulta em penalidades para a concessionária, como o pagamento de multas à ANEEL, conforme estabelecido na Resolução Normativa nº 063, de 12 de maio de 2004. Houve uma significativa melhora nestes indicadores nos últimos anos (ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL, 2008). De acordo com a ANEEL, em 1997 o DEC médio no país foi de 27,19 minutos e, em 2007, havia recuado para 16,08 minutos. Quanto ao FEC, em 1997 foi de 21,68 vezes e, em 2007, de 11,72 vezes. Esta melhora foi alcançada, em grande parte, devido aos projetos implementados pelas distribuidoras de energia elétrica na área de eficiência energética, que desde 1998 totalizam investimentos de mais de R\$ 1,93 bilhão. Tendo estas considerações em vista, justifica-se o crescente interesse das distribuidoras no desenvolvimento e implementação de métodos seguros de diagnóstico de curtos-circuitos em seus alimentadores, a fim de reduzir ao máximo o número de interrupções no fornecimento, bem como a duração média destas interrupções.

Do ponto de vista técnico, a causa mais freqüente de desligamentos não-programados no Sistema de Distribuição são os curtos-circuitos, ou faltas *shunt* (NORMA ND.78, 2008). Tais faltas consistem basicamente na conexão acidental ou intencional, através de uma baixa impedância, entre dois ou mais pontos de um circuito que normalmente se encontram em potenciais diferentes (KASIKCI, 2002), podendo ocorrer mesmo em sistemas bem projetados. Sua ocorrência leva ao rápido estabelecimento de elevadas correntes transitórias, geralmente muito superiores aos valores nominais do sistema, dando origem a esforços eletromecânicos e térmicos que podem ocasionar sérios danos aos equipamentos do sistema e expor a segurança de pessoas e animais a graves riscos. As causas mais freqüentes de curtos-circuitos em sistemas aéreos de distribuição são: falhas de equipamentos e isoladores, sobretensões de manobras e descargas atmosféricas, vandalismo, acidentes (incluindo os de trânsito), ação de animais e contato dos condutores nus da rede com a vegetação ou outros elementos externos ao sistema. Nos sistemas trifásicos aterrados ocorrem basicamente 4 tipos de curtos-circuitos: monofásicos, bifásicos, bifásicos à terra e trifásicos. As estimativas quanto ao percentual de ocorrência de cada tipo de curto variam ligeiramente entre as distribuidoras. Na ELEKTRO, do total das faltas estima-se que 85% correspondam ao tipo fase-terra e que também 85% correspondam a faltas transitórias (NORMA ND.78, 2008).

Com o avanço dos sistemas de automação baseados na tecnologia digital, tornou-se técnica e economicamente atraente a implementação de sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition System*) para a automação de subestações (ACKERMAN, 2006). Assim, tem se tornado cada vez mais comum a utilização de relés e medidores digitais, também denominados IEDs (*Intelligent Electronic Devices*) que, juntamente com os TCs (*Transformadores de Corrente*) e TPs (*Transformadores de Potencial*), constituem a base dos sistemas SCADA. Relés baseados em tecnologia digital podem agregar uma grande variedade de funções em um único dispositivo, sendo as funções mais comuns: relé de sobrecorrente instantâneo e temporizado de fase e neutro, relé de religamento, relé de sobrecarga, relé diferencial de barra (fase e neutro), relé de subtensão e sobretensão e relé de falta e inversão de fases. Os dispositivos mais modernos também dispõem das funções de medição e oscilografia, entre várias outras. Para os estudos de Qualidade de Energia a função de oscilografia de tensões e correntes apresenta interesse especial (SANTOSO; POWERS; BHATT, 2000, MANASSERO JÚNIOR; ROLIM; ZÜRN, 2009).

Com o intuito de superar as dificuldades associadas ao processo de detecção, classificação e localização de faltas, diversas propostas têm sido apresentadas na literatura. Uma destas propostas consiste na aplicação de sistemas especialistas (MACDONALD; BURT; YOUNG, 1992). Sistemas especialistas são programas computacionais que modelam o raciocínio e o processo de tomada de decisão de especialistas de uma dada área (MOMOH; EL-HAWARY, 2000). Sua arquitetura é formada por três componentes principais: uma base de conhecimento, um conjunto de regras de inferência e uma interface com o usuário. O potencial destes sistemas está no conhecimento heurístico obtido por meio da experiência dos especialistas em uma determinada área. Contudo, sua aplicação ao problema de diagnóstico de faltas é prejudicada por alguns fatores, tais como as mudanças frequentes na topologia da rede, a baixa imunidade a ruídos e dados corrompidos e as dificuldades associadas a sua implementação inicial.

Várias propostas encontradas na literatura baseiam-se na aplicação da teoria de circuitos elétricos lineares aliada ao conhecimento detalhado da topologia do alimentador (SENGER et al., 2005, BRETAS; SALIM, 2006, PEREIRA, 2007). Apesar de diferirem bastante em seus algoritmos, em geral estas propostas são baseadas no cálculo do fluxo de potência trifásico nos períodos pré e pós-falta para estimar o estado do alimentador. As prováveis seções em falta são selecionadas por meio da comparação dos efeitos gerados por uma falta simulada em tais seções com os valores medidos de tensões e correntes em certos pontos do sistema, resultantes da falta real. Um mecanismo de depuração iterativo é, em geral,

implementado a fim de selecionar a seção em falta. Nos cálculos envolvidos neste processo são empregados freqüentemente apenas os fasores de sequência positiva dos componentes fundamentais das tensões e correntes. Em geral, o tempo de convergência é elevado e dependente do tipo de falta. Erros na estimativa dos fasores de sequência positiva podem levar à perda da precisão na localização da falta, ao passo que o cálculo exato de tais fasores pode demandar um tempo elevado para uma operação on-line (PÁDUA et al., 2007).

Propostas baseadas na utilização de lógica *fuzzy* (ou lógica nebulosa) têm alcançado grande sucesso (DECANINI, 2008, MESA et al., 2006) na solução do problema de diagnóstico de faltas, bem como em outras importantes aplicações em sistemas elétricos de potência. Sistemas *fuzzy* são capazes de lidar simultaneamente com dados numéricos e informações lingüísticas, incorporando ambigüidades, imprecisões e incertezas impossíveis de serem quantificadas por meio da matemática tradicional. Basicamente, um sistema *fuzzy* consiste em um mapeamento não-linear de um espaço vetorial de entrada em um espaço de saída escalar. Em aplicações de engenharia, os sistemas *fuzzy* são constituídos por 4 componentes (MENDEL, 1995): um conjunto de regras, um nebulizador (*fuzzifier*), um mecanismo de inferência e um desnebulizador (*defuzzifier*). O conjunto de regras é geralmente desenvolvido por um especialista da área de aplicação, sendo cada regra expressa por uma relação do tipo SE-ENTÃO. Enquanto na teoria de conjuntos tradicional uma variável  $x$  é vista como pertencente ou não-pertencente a um dado conjunto  $A$ , na teoria de conjuntos *fuzzy* tal relação é expandida através do conceito de função de pertinência, ou seja, o grau em que  $x$  pertence ao conjunto  $A$  passa a ser dado por uma função cuja saída pode assumir qualquer valor entre 0 e 1. Assim, é possível estabelecer fronteiras graduais entre conjuntos de decisão, o que permite representar matematicamente incertezas e ambigüidades.

Propostas baseadas na utilização de redes neurais artificiais estão se tornando bastante comuns na literatura (YANG; CHANG; HUANG, 1995, MORETO, 2005, SILVA et al., 2007, OLESKOVICZ; AGGARWAL; COURRY, 2003). Vários fatores tornam interessante sua aplicação ao problema de diagnóstico de faltas, sendo possível afirmar que, dentre eles, a capacidade de implementação de complexos mapeamentos não-lineares, a adaptabilidade, a capacidade de generalização e a alta tolerância a falhas e ruídos constituem os mais relevantes para a maioria das aplicações. A possibilidade de implementação em VLSI (*Very Large Scale Integration*) (HAYKIN, 2001) torna as redes neurais artificiais uma alternativa importante em situações que exigem respostas em tempo real, como na operação e proteção on-line dos sistemas de distribuição de energia elétrica. Além disso, problemas complexos mal formulados, que em geral não admitem solução adequada por meio de algoritmos

determinísticos, podem ser facilmente resolvidos através da utilização de redes neurais artificiais.

Uma rede neural artificial é um sistema de processamento de informação cuja arquitetura é inspirada nas redes neurais biológicas. É formada por unidades simples de processamento, denominadas neurônios, os quais são interconectados por elos sinápticos associados a pesos. O padrão de conexão entre os neurônios define a arquitetura da rede, enquanto o processo de ajuste dos pesos sinápticos define o algoritmo de aprendizado, ou treinamento da rede. Assim, as redes neurais podem ser totalmente ou parcialmente conectadas, acíclicas ou recorrentes, com treinamento supervisionado ou não-supervisionado, sendo estes parâmetros criteriosamente escolhidos conforme a aplicação de interesse. As redes neurais acíclicas, totalmente conectadas, treinadas mediante um algoritmo supervisionado denominado algoritmo de retropropagação de erro (*back-propagation*), conhecidas como perceptrons de múltiplas camadas, são utilizadas com sucesso em tarefas como classificação de padrões e mapeamentos não-lineares (ou aproximação universal de funções não-lineares). Estas redes são empregadas no processo de detecção e classificação de curtos-circuitos proposto neste trabalho. Várias outras propostas são encontradas na literatura que trata do problema de diagnóstico de faltas em sistemas elétricos de potência. Dentre elas pode-se citar: sistemas baseados em lógica tradicional de relés (HOU, 2006), abordagem probabilística (PARADELO JÚNIOR; SCHMIDT, 2007) e *Data Mining* (DOLA; CHOWDHURY, 2005), dentre outras. Após esta breve introdução, o trabalho desenvolvido está organizado como segue:

- No capítulo 2 apresenta-se uma visão geral de um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica, incluindo os modernos Sistemas de Automação de Subestações;
- No capítulo 3 é apresentado o equacionamento básico utilizado no processamento digital das grandezas elétricas de interesse, via Transformada Discreta de Fourier, com o enfoque adotado neste trabalho;
- No capítulo 4 são apresentados os princípios básicos de projeto e operação das Redes Neurais Artificiais, abordando-se apenas os pontos relevantes para a aplicação neste trabalho;
- No capítulo 5 é apresentada e discutida a metodologia proposta;
- No capítulo 6 são apresentados e discutidos os resultados obtidos;
- No capítulo 7 são apresentadas as conclusões;
- No apêndice apresentam-se os dados do alimentador, utilizados no cálculo das correntes de curto-circuito através do *software* ATP.

## 2. SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

### 2.1. ASPECTOS GERAIS DOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

A estrutura básica do SEP (*Sistema Elétrico de Potência*) é apresentada na figura 1, na qual estão indicados os níveis de tensão normalmente encontrados entre a geração e a distribuição.

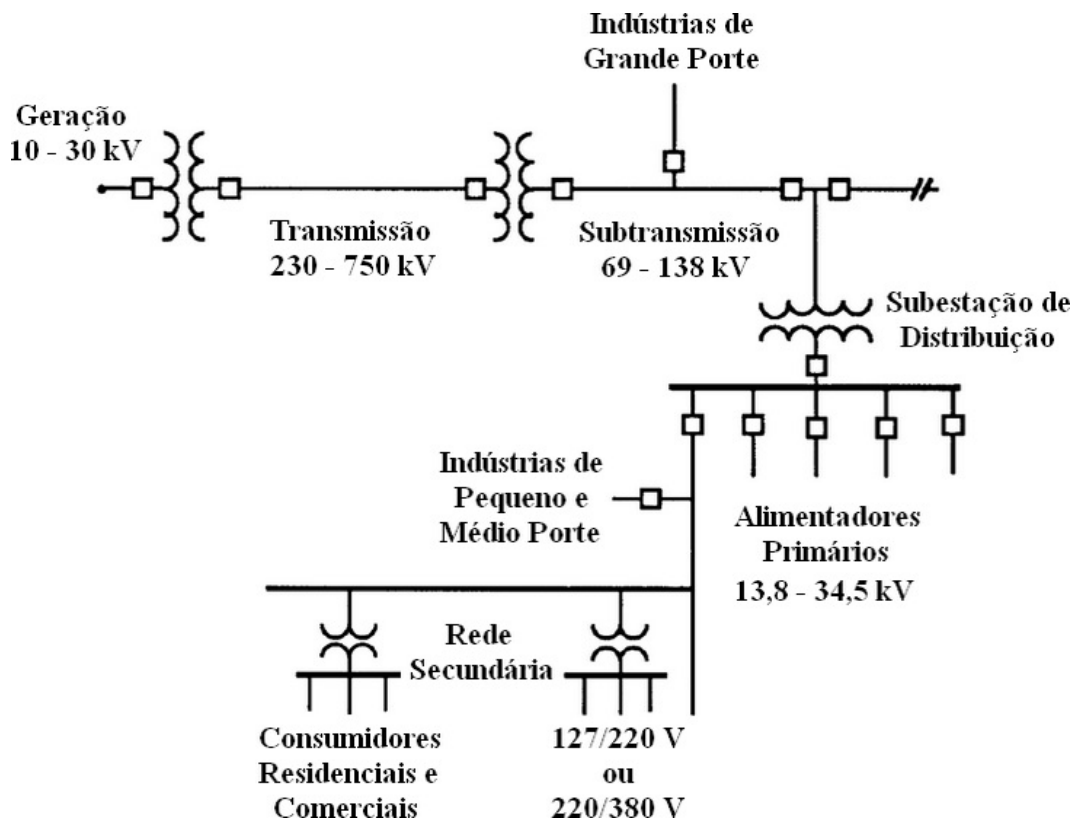


Figura 1: Sistema Elétrico de Potência. Adaptado de *Electric Power Engineering Handbook* (Grisby 2001, Crc Press).

Por razões técnicas, os geradores normalmente operam com tensões entre 10 e 30 kV, sendo muito comum a tensão de 13,8 kV. Estas tensões são elevadas para valores entre 230 e 750 kV, típicos do sistema de transmissão, a fim de reduzir as perdas associadas ao transporte da energia para os grandes centros de carga, normalmente distantes dos locais nos quais a energia é produzida. Próximo aos grandes centros de carga as tensões de transmissão são rebaixadas para valores entre 69 e 138 kV, normalmente encontrados no sistema de subtransmissão. Alguns consumidores especiais, como indústrias de grande porte, podem ser atendidos diretamente pelo sistema de transmissão. Contudo, é o sistema de subtransmissão



sendo operado por mais de 64 concessionárias. No Brasil, a transmissão é dividida em dois grandes blocos: o SIN (*Sistema Interligado Nacional*), com cerca de 89,2 mil quilômetros linhas nas tensões de 230, 345, 440, 500 e 750 kV, responsável pelo transporte de 96,6% de toda a energia elétrica gerada no país, e os sistemas isolados, instalados principalmente na região norte. Já o mercado de distribuição de energia elétrica, formado por mais de 61 milhões de unidades consumidoras, é atendido por 63 concessionárias. Cada concessionária, ou distribuidora possui direitos e obrigações definidos em um Contrato de Concessão celebrado com a União, o qual lhes permite a exploração do serviço público em sua área de concessão, sendo sua atuação regulada e fiscalizada pela ANEEL.

## **2.2. SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO**

O sistema de distribuição se inicia com a subestação de distribuição, a qual é geralmente alimentada por uma ou mais linhas de subtransmissão nas tensões de 34,5 kV, 69 kV ou 138 kV, podendo, contudo ser alimentada diretamente por uma linha de transmissão com tensões de 138 kV a 230 kV. Cada subestação de distribuição alimenta um ou mais alimentadores primários. Os alimentadores primários são, na maioria dos casos, radiais, significando que existe apenas um caminho para o fluxo de potência entre a subestação e o usuário final.

Segundo a norma NBR 5460, uma subestação de distribuição é basicamente uma subestação rebaixadora destinada à alimentação de um sistema de distribuição. Portanto, sua principal função consiste no rebaixamento dos níveis de tensão de transmissão e/ou de subtransmissão para níveis que permitam a instalação segura dos condutores que formam o sistema de distribuição nas vias públicas adjacentes às propriedades dos consumidores finais. No Brasil são utilizados diferentes níveis de tensão na distribuição primária (GOUVÊA, 2006), sendo 13,8 kV o mais comum, mas são também utilizados valores como 3,8 kV, 6,6 kV, 11,9 kV, 23,1 kV e 34,5 kV, entre outros. Além das diferenças nos níveis de tensão de operação dos alimentadores, também os arranjos, as configurações e as capacidades das subestações de distribuição variam bastante entre as empresas concessionárias e mesmo dentro de uma mesma empresa.

Subestações de distribuição são constituídas por equipamentos, sendo assim designados os elementos que processam diretamente a potência elétrica (transformadores, motores e compensadores), e dispositivos, consistindo estes últimos nos elementos que auxiliam no controle, mas não processam diretamente a potência elétrica (elementos como

chaves, estruturas de suporte, fusíveis, etc.). Os disjuntores, por sua complexidade e custo elevado, são geralmente classificados como equipamentos.

O projeto de uma subestação de distribuição depende de diversos fatores, dentre os quais podem-se destacar as tensões das linhas de transmissão e/ou subtransmissão que deverão alimentar a subestação e as tensões previstas dos alimentadores, as características das cargas atendidas, a densidade demográfica da região e sua previsão de crescimento, o espaço físico disponível no terreno para a instalação dos equipamentos e dispositivos, a localização do terreno (dentro ou fora do perímetro urbano), a sofisticação e custo do sistema de proteção e ainda a presença de outras subestações na mesma região. Apesar de sua grande importância, não existe uma padronização única a ser seguida pelas concessionárias, sendo essas obrigadas a elaborar seus próprios padrões. Assim, as empresas podem empregar critérios de projeto diferentes. A padronização no projeto de subestações é desejável uma vez que leva à redução no tempo de projeto e a simplificações na construção e manutenção (COELCE, 2003), possibilitando uma expressiva redução nos custos de implementação. Contudo, o excesso de padronização pode levar, em alguns casos, a um projeto economicamente inviável para a área a ser atendida.

### **2.2.1. FALTAS E CURTOS-CIRCUITOS**

A NBR 5460 define falta como uma *“ocorrência acidental e súbita, ou defeito, em um elemento de um sistema elétrico, que pode resultar em falha do próprio elemento e/ou de outros elementos associados”*. Devido a enorme importância deste tema para a estabilidade e a segurança dos sistemas elétricos de potência, muitos estudos têm sido efetuados a fim de propor metodologias de previsão, detecção e localização de faltas em sistemas elétricos de potência.

Em termos gerais, uma falta consiste em um mau funcionamento no sistema. Muitas faltas são, ou resultam em curtos-circuitos. Algumas são originadas por descargas atmosféricas e tempestades. Ventavais podem causar o rompimento de linhas e a queda de postes, ou ainda fazer com que os galhos das árvores toquem as linhas. Em alguns países de clima frio, neve e gelo podem se acumular sobre as linhas provocando o seu rompimento. Os principais tipos de falta em sistemas de distribuição são: curto-circuito fase-terra (cerca de 70%); curto-circuito bifásico (cerca de 15%); curto-circuito bifásico a terra (cerca de 10%); curto-circuito trifásico a terra (menos que 1%); abertura incorreta de circuitos por manobras inadequadas (muito poucos). As porcentagens indicadas podem variar de sistema pra sistema.

Na ocorrência de uma falta, as pessoas e os equipamentos devem ser protegidos através da desconexão e do isolamento do segmento faltoso do sistema. Para isto são utilizados dispositivos como disjuntores, seccionadoras e fusíveis. No que segue, os termos *falta* e *curto-circuito* serão empregados com a mesma acepção, sendo esta equivalência freqüentemente encontrada em trabalhos da área.

A remoção rápida da alimentação do circuito faltoso é essencial para prevenir consequências mais graves. Quanto mais rápida a isolação da falta, menores serão os danos aos equipamentos, linhas, e dispositivos no circuito faltoso. Uma falta persistente pode ocasionar um sobre-aquecimento anormal ou mesmo fundir as linhas, causar a torção dos enrolamentos dos transformadores e barramentos devido as forças eletromecânicas causadas pelo intenso campo magnético gerado pelas correntes de falta. O excessivo sobre-aquecimento do óleo dos transformadores pode ocasionar sua queima ou mesmo levar a explosões, com um conseqüente tempo elevado de retirada de serviço devido aos grandes reparos necessários. Outro problema causado pelas faltas é a redução da estabilidade do sistema elétrico. Isto pode ocasionar saída de serviço dos geradores devido a atuação de suas proteções.

Os valores máximo e mínimo das correntes de falta devem ser conhecidos para que se possa projetar a proteção adequada ao circuito. Contudo, devido a rápida expansão dos sistemas de distribuição e à conseqüente elevação das correntes de curto-circuito nas barras, existe a necessidade de verificações periódicas da capacidade de interrupção dos equipamentos de proteção, para sua adequação aos novos níveis de correntes de falta (MAMEDE, 2004). Por esta razão, as empresas concessionárias recalculam anualmente as potências de curtos-circuitos nas barras de suas subestações, a fim de verificar a adequação da capacidade dos equipamentos e efetuar, se necessário, a revisão dos programas de manutenção. Um dispositivo que requer especial atenção é o disjuntor, o qual pode apresentar grande desgaste devido ao número de operações em curto-circuito.

Em geral, para a simplificação dos cálculos, são adotadas algumas hipóteses simplificadoras na modelagem da rede elétrica. Admite-se, a princípio, que as máquinas síncronas do sistema operam com tensões de 1 pu, desprezam-se as cargas, admite-se a operação em derivação nominal dos transformadores e considera-se a sequência negativa idêntica à sequência positiva. Atualmente, estão disponíveis diversos *software* direcionados ao cálculo de curtos-circuitos em sistemas de distribuição. Estes *software* utilizam para o cálculo uma formulação determinística, representada genericamente pela equação 1.

$$I_{cc(l,t_{cc})} = f \left[ V, (Z_s/t_{cc}), (Z_l/l, t_{cc}) \right] \quad (1)$$

sendo:

$I_{cc(l,t_{cc})}$  - corrente de curto circuito;

V - tensão pré-falta da fonte;

$Z_s$  - impedância equivalente da fonte;

$Z_l$  - impedância equivalente da rede até o local da falta;

l - local da falta;

$t_{cc}$  - tipo de curto-circuito.

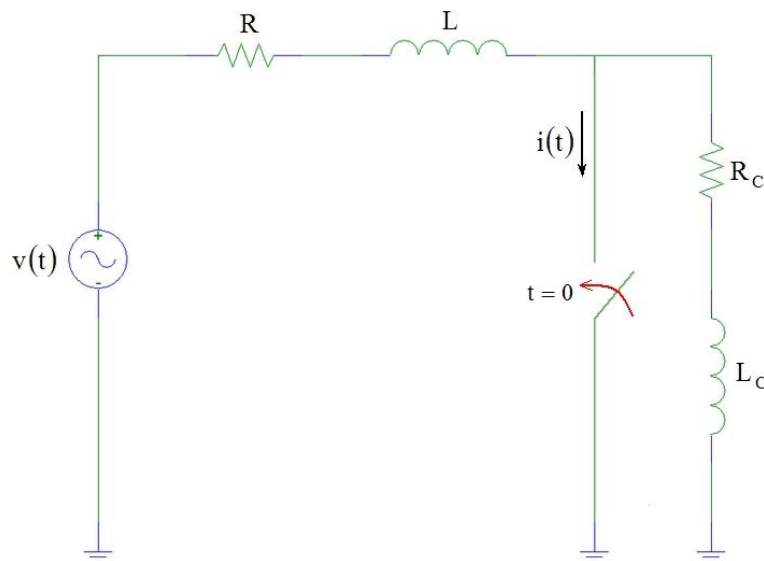
Esta equação indica a dependência das correntes de curto-circuito dos parâmetros elétricos da rede, tais como a tensão pré-falta, o local e o tipo de falta que se deseja calcular. A partir do conhecimento das correntes de curto-circuito pode-se (NUNES; COUTINHO, 1991):

- Calcular os efeitos mecânicos sobre as estruturas produzidos pelas interações eletromagnéticas geradas pelas elevadas correntes de curto-circuito;
- Dimensionar a seção dos contatos dos disjuntores e a capacidade disruptiva da câmara de extinção do arco-elétrico;
- Dimensionar o transformador de corrente quanto ao nível de saturação da curva de magnetização definida pela sua classe de exatidão;
- Efetuar a coordenação dos relés;
- Analisar a sobretensão na frequência industrial devido a curto-circuito;
- Conhecer o tempo de atuação do relé para analisar as perturbações relacionadas aos harmônicos e à estabilidade dinâmica do sistema elétrico;
- Determinar os limites de suportabilidade térmica de cabos, transformadores, chaves de manobra, etc., pelo tempo necessário para atuação dos equipamentos de proteção.

Métodos aproximados de cálculo da corrente de falta, que assumem a não ocorrência de afundamento da tensão durante a falta, podem não ser adequados para o cálculo de faltas na distribuição ou transmissão. Um cálculo preciso das correntes de falta na transmissão ou na distribuição deve levar em conta os componentes simétricos destas correntes.

### 2.2.1.1. Natureza das Correntes de Curto-Circuito

É possível obter-se uma boa visão inicial sobre a natureza das correntes de curto-circuito através da análise do transitório (e do regime) de um curto-circuito sobre uma impedância constante. Considere-se, assim, uma fonte de tensão perfeitamente senoidal ( $v(t) = V_m \text{sen}(\omega t)$ ), monofásica, 60 Hz, conectada a uma linha monofásica representada por uma resistência e uma indutância constantes, conforme figura 3. A impedância desta linha é dada por  $\dot{Z} = R + j\omega L$  (linha de comprimento pequeno). Para um sistema trifásico balanceado, o modelo monofásico é perfeitamente adequado. Considere-se que o curto-circuito ocorra no terminal final da linha. Uma vez que a fonte de tensão considerada é ideal sua impedância interna é considerada desprezível e, assim, a corrente de curto é limitada somente pela impedância da linha. A corrente de curto-circuito em regime será, portanto, dada por  $V_{\text{rms}}/Z$ . Assume-se aqui que a impedância  $Z$  não se modifica com o fluxo da elevada corrente de curto, o que equivale a dizer que as impedâncias dos elementos do sistema (linhas de transmissão, reatores e transformadores, etc.) são lineares e invariantes no tempo. Obviamente esta constitui somente uma simplificação, uma vez que as altas correntes de curto modificam as impedâncias do sistema, por exemplo, através da alteração da resistência dos cabos e saturação dos núcleos dos transformadores. Isto introduz distorção nas formas de onda com a introdução de componentes harmônicos, mas estes efeitos serão aqui desprezados.



**Figura 3: Fonte ideal de tensão senoidal conectada a uma linha monofásica.**

Com as simplificações consideradas, o circuito da figura 3 pode ser facilmente equacionado como segue:

$$v(t) = V_m \sin(\omega t + \theta) = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{d}{dt} i(t) \quad (2)$$

sendo  $\theta$  o ângulo da tensão no instante da falta ( $t = 0$ ).

Considerando-se que, no instante da falta, a corrente no sistema é nula (nenhuma energia armazenada nas indutâncias), ou seja  $i(0) = 0$ , o que equivale a afirmar que a corrente normal de carga é muito inferior a corrente de curto-circuito e aplicando a Transformada de Laplace aos dois lados da equação anterior, tem-se:

$$V_m \cdot \left( \cos(\theta) \cdot \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} + \sin(\theta) \cdot \frac{s}{s^2 + \omega^2} \right) = R \cdot I(s) + L \cdot [s \cdot I(s) - i(0)] \quad (3)$$

Da equação anterior obtém-se facilmente  $I(s)$  como sendo:

$$I(s) = \frac{V_m \cos(\theta)\omega + V_m \sin(\theta)s}{(R + sL) \cdot (s^2 + \omega^2)} = \frac{K_1}{R + sL} + \frac{K_2}{s + j\omega} + \frac{K_3}{s - j\omega} \quad (4)$$

A determinação de  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$  permite a obtenção da Transformada Inversa de Laplace através de tabelas de anti-transformadas, obtendo-se para  $i(t)$  a seguinte expressão:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \theta - \phi) - I_m \sin(\theta - \phi) \cdot e^{-(R/L)t} \quad (5)$$

sendo  $I_m = V_m / \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = V_m / Z$  a corrente de regime permanente e  $\phi = \text{tg}^{-1}(\omega L / R)$ .

Assim, ao se estabelecer um curto-circuito segue-se um período transitório no qual, imediatamente após o fechamento do curto, a corrente é assimétrica, podendo ser descrita pela equação 5. Nesta equação, a constante de tempo do circuito é dada por  $\tau = L/R$ , o componente simétrico  $I_m \sin(\omega t + \theta - \phi)$  é denominado componente em regime e o componente  $I_m \sin(\theta - \phi) \cdot e^{-(R/L)t}$  é denominado componente contínuo (ou unidirecional). A corrente  $i(t)$  é a corrente dinâmica do curto-circuito. Como se observa da equação 5, a assimetria da corrente é máxima imediatamente após o estabelecimento do curto. Já a duração do componente exponencial é uma função da constante de tempo do circuito. Os valores normais de tempo de duração do componente contínuo variam entre 1/2 e 8 ciclos. O componente simétrico é em geral determinado pelos métodos convencionais de cálculo de curtos-circuitos, através da utilização de componentes simétricos. Para o cálculo da corrente

assimétrica são utilizados fatores de assimetria, os quais são multiplicados pelo valor eficaz da corrente em regime. Em geral o fator de assimetria varia entre 1 e 1,7, dependendo da relação X/R do circuito (e, portanto, depende da localização do curto).

A magnitude da corrente assimétrica é empregada na determinação da capacidade de interrupção dos disjuntores. O valor eficaz do componente simétrico é utilizado nos estudos de seletividade e coordenação.

O cálculo destas correntes, como já mencionado, envolve a utilização de diagramas sequenciais (ou de sequência de fase) acoplados em função do tipo de curto estudado. Assim, são montados os diagramas de sequência positiva, negativa e zero dos geradores, transformadores (bancos trifásicos ou a núcleo envolvente) e linhas, envolvidos no cálculo da corrente de curto. Uma descrição detalhada dos cálculos envolvidos foge ao escopo desta dissertação, mas pode ser encontrada facilmente na literatura especializada (ANDERSON, 1995).

### **2.2.2. EQUIPAMENTOS DE MANOBRA E PROTEÇÃO**

A segurança e a manutenção dos diversos equipamentos que operam em uma subestação e/ou linha de distribuição constituem objetivos importantes de projeto. Múltiplos equipamentos de manobra e proteção são empregados com esta finalidade. As funções básicas que devem ser atendidas por tais equipamentos incluem a adequada isolação e manobra de cargas, bem como a interrupção de possíveis correntes de falta. A manutenção e a operação do sistema, bem como a intensidade e a duração das correntes de carga ou de falta constituem fatores que devem ser considerados na escolha do equipamento. A decisão sobre a operação monofásica ou trifásica dos equipamentos constitui outra escolha importante. Os sistemas elétricos de alta tensão são normalmente operados como sistemas trifásicos, e o desbalanceamento resultante da operação de equipamentos no modo monofásico deve ser considerado.

Os equipamentos elétricos de alta tensão com isolação a ar obedecem a padrões baseados em temperatura ambiente e altitude. Assume-se, em geral, que a temperatura ambiente varia em uma faixa de -40 a 40 graus Celsius. Em altitudes elevadas, a densidade do ar decresce, o que implica na redução de sua rigidez dielétrica. Nestas circunstâncias, a disposição dos equipamentos deve ser feita de forma a compensar a redução da rigidez dielétrica do ar ambiente.

### 2.2.2.1. Chaves Seccionadoras

Uma seccionadora é basicamente uma chave mecânica empregada para alterar conexões ou para isolar um circuito de sua fonte de potência, sendo normalmente utilizada na isolação de equipamentos em operações de manutenção. Por questões de segurança, sua instalação deve ser feita em ambos os lados do equipamento para assegurar a desconexão dos condutores de energia. Contudo, mesmo com a chave seccionadora na posição abertura, o equipamento desenergizado deve ser solidamente aterrado para garantir a proteção dos trabalhadores.

### 2.2.2.2. Disjuntores

Um disjuntor é um dispositivo eletromecânico capaz de estabelecer, manter e bloquear correntes em um circuito em condições normais de operação, indefinidamente ou por um tempo especificado, ou bloquear correntes sob condições anormais de operação, tais como um curto-circuito. São classificados geralmente de acordo com o meio empregado de resfriamento e extinção do arco elétrico.

Os disjuntores são instalados em associação aos respectivos relés de proteção, os quais são responsáveis pela detecção das correntes de falta. A atuação de um disjuntor depende sempre de um sinal, ou *trip*, enviado por um relé de proteção a ele associado. São equipamentos robustos, projetados para operar em severas condições ambientais (temperatura, umidade, poeira, etc.). Por vezes passam por longos períodos sem atuação. Ainda assim devem estar prontos a operar quando solicitados.

### 2.2.2.3. Religadores Automáticos

São equipamentos de interrupção da corrente elétrica capazes de efetuar um dado número de repetições das operações de abertura e fechamento de seus contatos durante a ocorrência de uma falta. São aplicados nos sistemas de distribuição devido ao fato de que a maioria das faltas verificadas é de natureza temporária, impedindo-se desta forma o desligamento desnecessário de ramais ou trechos de linhas de distribuição. Em geral, são utilizados equipamentos trifásicos, mas podem ser empregados bancos monofásicos com operação simultânea. Entre os ajustes possíveis estão: valor da corrente de acionamento, número de disparos e curva de atuação.

#### 2.2.2.4. *Chave de Aterramento de Alta Velocidade*

Chaves de aterramento de alta velocidade são utilizadas para a proteção de bancos de transformadores quando outro tipo de proteção implica em custos muito elevados. Sua atuação consiste no aterramento do barramento de alta tensão que alimenta o equipamento (geralmente um banco de transformadores), o qual é detectado pelo equipamento de proteção, provocando a interrupção da linha que alimenta o transformador. Contudo, outros equipamentos podem ser afetados por esta interrupção. Uma seccionadora automática é freqüentemente utilizada para, na ausência de tensão, isolar o banco de transformadores e permitir o religamento automático da linha.

#### 2.2.2.5. *Fusíveis*

Fusíveis de potência são geralmente empregados para a proteção de transformadores de potência em subestações de distribuição. Sua atuação consiste basicamente na interrupção de faltas permanentes. Constituem uma alternativa econômica para disjuntores. São normalmente utilizados em transformadores que operam em tensões de 34,5 a 138 kV. A instalação de fusíveis de potência exige a definição correta de suas características de atuação (curva de resposta), bem como a coordenação lógica com outros dispositivos de proteção.

Nas linhas de distribuição são empregados fusíveis limitadores primários. Estes dispositivos se caracterizam por sua ação rápida e grande capacidade de interrupção. São capazes de interromper elevadas correntes de curto-circuito em um único semiciclo, antes que atinjam seu valor de crista. Contudo, não apresentam um bom desempenho para correntes inferiores a 2,5 vezes a nominal. Assim, os fabricantes disponibilizam tabelas e gráficos que permitem determinar a corrente mínima de atuação segura de tais dispositivos. São muito utilizados na proteção de transformadores de distribuição e motores de média tensão (2,3 a 13,8 kV). São aplicados normalmente em chaves fusíveis indicadoras que permitem a verificação visual da atuação do elemento fusível.

#### 2.2.2.6. *Relés de Proteção*

Estes dispositivos abrangem uma ampla faixa de aplicações de proteção. Sua finalidade básica é detectar anormalidades em sua zona de proteção. Um relé, qualquer que seja sua aplicação, deve ser capaz de medir e comparar uma grandeza de interesse, acionando a operação de disjuntores ou relés auxiliares com base nos resultados desta comparação e

ainda sinalizar tais operações (sinalização visual, sonora e/ou via sinais enviados a um centro de operação). Suas características de operação estão vinculadas à tarefa de proteção que exercem no sistema. Os mais comumente encontrados são:

- Relés diferenciais (transformadores, geradores);
- Relés de distância (linhas);
- Relés de sobrecorrente instantâneo ou temporizado, com ou sem unidade direcional (linhas e transformadores);
- Relés de sobrecorrente de neutro temporizado, com ou sem unidade direcional (linhas e transformadores).

Nos sistemas de distribuição é comum a aplicação dos seguintes relés (ARAÚJO et al., 2005): sobrecorrente instantâneo (50), sobrecorrente temporizado (51), sobretensão (59), subtensão (27), diferencial (87), direcional (67), relé de bloqueio (86), relé de religamento (79), relé auxiliar (50X, 59X, etc.), relé de pressão (63), relé de distância (21), relé de subfrequência (81) e relé de sincronismo (25).

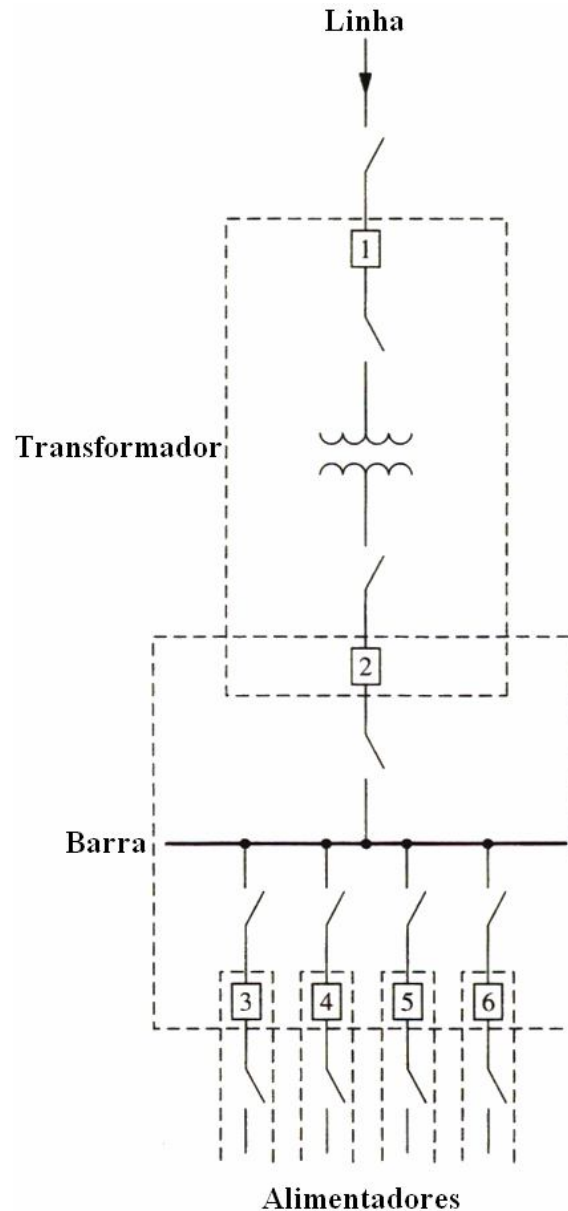
Geralmente, os relés instantâneos protegem o equipamento, enquanto que as unidades temporizadas servem como retaguarda. Detalhes maiores sobre tais dispositivos, principalmente aqueles baseados em tecnologia digital, serão vistos mais adiante neste trabalho.

### **2.3. PROTEÇÃO DAS SUBESTAÇÕES E ALIMENTADORES DE DISTRIBUIÇÃO**

Uma vez que é impossível tornar os sistemas elétricos imunes às perturbações, defeitos e faltas fatalmente ocorrerão, ainda que tais sistemas sejam bem projetados. Assim, os sistemas de proteção devem detectar, localizar e eliminar todas as faltas, de forma a garantir a qualidade do serviço e minimizar os tempos de interrupção. Os critérios básicos que norteiam o projeto e implementação de um sistema de proteção são: velocidade de atuação, seletividade e coordenação, sensibilidade, confiabilidade e segurança (ARAÚJO et al., 2005).

Os disjuntores, acionados pelos relés, constituem os principais dispositivos utilizados na proteção dos equipamentos da subestação, sendo também empregados fusíveis no primário dos transformadores nas subestações de menor porte. Cada conjunto de relés e disjuntores é ajustado para proteger uma certa área ou zona da subestação e restringir a porção da subestação removida de serviço por uma dada falta. A seção da subestação, retirada de serviço por um dado ajuste de relé (na ocorrência de uma falta), constitui sua zona de proteção. Na

figura 4 as zonas de proteção dos disjuntores dos alimentadores são constituídas pelos alimentadores individualmente. A zona de proteção do barramento é constituída pelo barramento e pelas conexões ao barramento.



**Figura 4: Zonas de proteção.**

Como indica a figura 4, as zonas de proteção são sobrepostas. Se uma falta muito severa ocorrer em um dos alimentadores, os relés de sobrecorrente do disjuntor do secundário do transformador podem eventualmente operar se por alguma razão o disjuntor do alimentador não operar. Este disjuntor é, portanto, um *backup*, ou proteção de retaguarda para os alimentadores e também para o barramento. Cada elemento de proteção normalmente possui uma proteção secundária associada, de forma a assegurar a proteção dos equipamentos

caso a proteção principal apresente falha em sua operação. A maior parte da subestação, ou toda ela pode ser retirada de serviço pela proteção de retaguarda.

Os relés operam a partir das medições de corrente e tensão efetuadas pelos transformadores de corrente e potencial, mas seus circuitos de *trip* normalmente são supridos com tensão dc fornecida por bancos de baterias instaladas na subestação. As baterias são continuamente recarregadas (baterias com núcleo de chumbo), de forma que estão sempre prontas quando necessário.

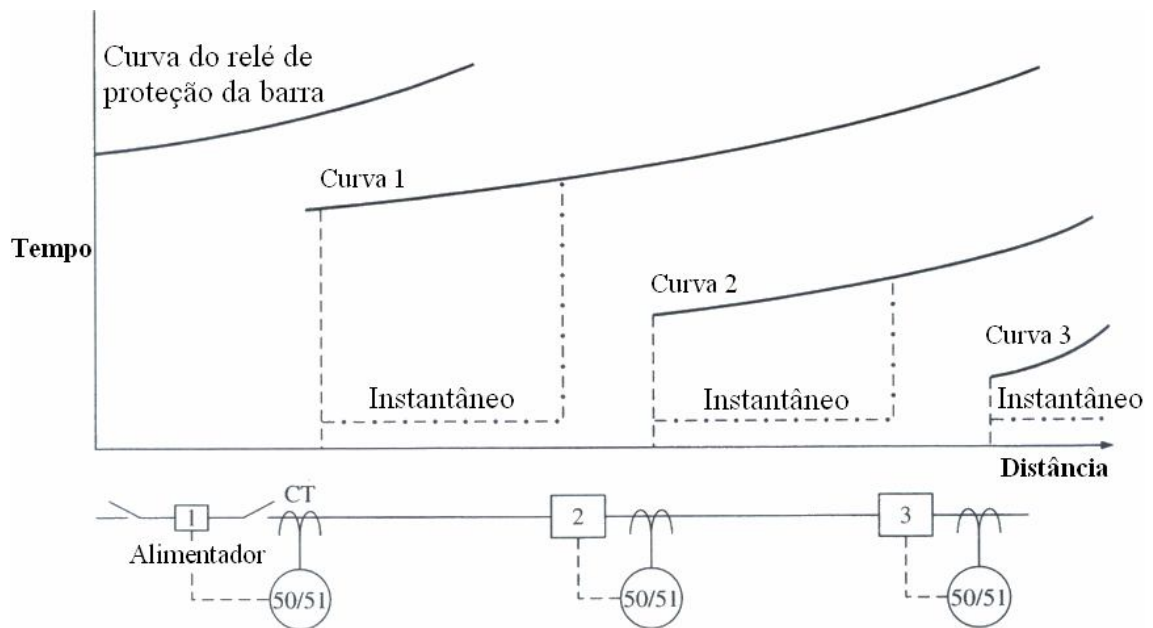
Os dispositivos de proteção de sobrecorrente devem ser coordenados para assegurar que apenas a seção em falta na subestação seja retirada de serviço, a menos que a primeira linha de proteção falhe. Portanto, o elemento de proteção instalado em um ponto mais distante da falta deve demorar mais para operar, em qualquer corrente de falta, do que o elemento de proteção instalado mais próximo do ponto de falta. A utilização de fusíveis e relés de sobrecorrente com curva de tempo dependente (curva normalmente inversa, muito inversa e extremamente inversa) auxilia bastante na coordenação. Os procedimentos para a coordenação dos relés de sobrecorrente são idênticos aos adotados para os fusíveis. Os fabricantes de relés, religadores e fusíveis fornecem, com seus equipamentos, uma extensa literatura com detalhamento de técnicas de coordenação da proteção para os seus dispositivos, geralmente com muitos exemplos de aplicação.

Geralmente, os relés de sobrecorrente são compostos por duas unidades: instantânea e temporizada. Nos esquemas elétricos que representam equipamentos de proteção, estas recebem os números 50 e 51, respectivamente. Se o estiver ligado para proteção de fase, as suas unidades são conhecidas como 50 e 51 de fases. No caso de estar realizando a proteção de neutro ou terra, fala-se em unidades 50 e 51 de neutro (ou terra). A unidade 50 atua instantaneamente ou segundo um tempo previamente definido. Já a unidade 51 pode atuar com curvas de tempo dependente ou de tempo definido. As unidades temporizadas ou de tempo dependente permitem dois tipos de ajustes: corrente mínima de atuação e curva de atuação. As unidades instantâneas trabalham com dois ajustes: corrente mínima de atuação e tempo de atuação (tempo previamente definido). Antigamente, estas unidades eram eletromecânicas e não permitiam o controle de tempo, isto é, atuavam num tempo muito pequeno (da ordem de milissegundos), sem nenhum ajuste. Hoje, os relés digitais possibilitam ajustes de tempo de atuação destas unidades.

Os relés de proteção contra sobrecorrente com atuação instantânea devem ser coordenados estritamente pela corrente de operação. Os relés instalados em pontos mais afastados da falta devem operar com uma corrente maior do que os relés instalados próximos

à falta. Geralmente isto não constitui um problema porque estes relés são ajustados para atuar com correntes de falta e não de sobrecarga. Se os relés instantâneos não podem ser coordenados com ajustes de corrente mínima de atuação, então os relés a montante deverão ter um ajuste de tempo definido com atraso suficiente para prevenir a operação antes que os relés a jusante tenham tempo de operar. Se os relés a montante falham na operação então a proteção seguinte (de acionamento instantâneo) irá operar após um tempo de atraso fixo.

A coordenação da proteção através de relés de tempo dependente (fusíveis, relés de sobrecorrente) ao longo de um alimentador de distribuição é ilustrada na figura 5.

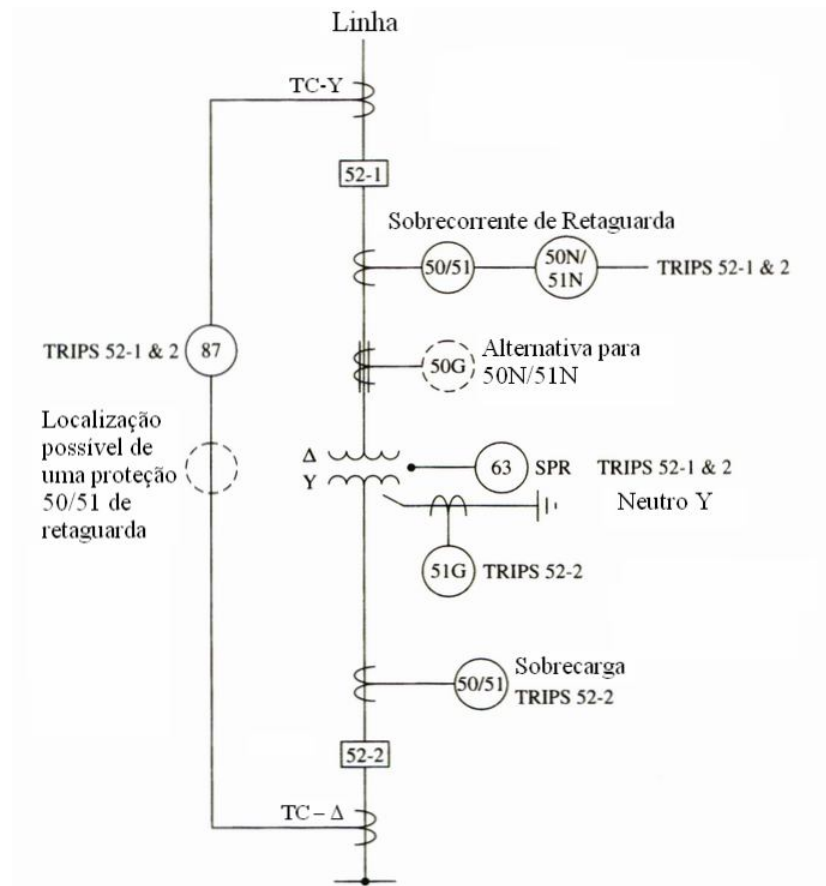


**Figura 5: Coordenação da proteção por relés de sobrecorrente com curvas de atuação de tempo inverso.**

As curvas sólidas são as características de tempo dependente dos relés de sobrecorrente. É possível observar que quanto mais distante da subestação a falta ocorrer maior a impedância do trecho da linha no circuito, e menor será a corrente de falta. A característica de tempo dependente significa que o relé deve operar mais rapidamente para as maiores correntes de falta do que para as menores. Portanto, como indica a figura 5, a curva de tempo por corrente de um relé de proteção de tempo dependente está correlacionada com a distância ao longo da linha. Quanto maior a corrente de falta, mais próximo deve estar o ponto de ocorrência da falta e mais rapidamente o dispositivo de proteção opera. Os relés de atuação instantânea utilizados como *backup* aos relés de tempo dependente são ajustados para disparar rapidamente na ocorrência de correntes de falta muito elevadas e assim minimizar os danos ocasionados por uma falta.

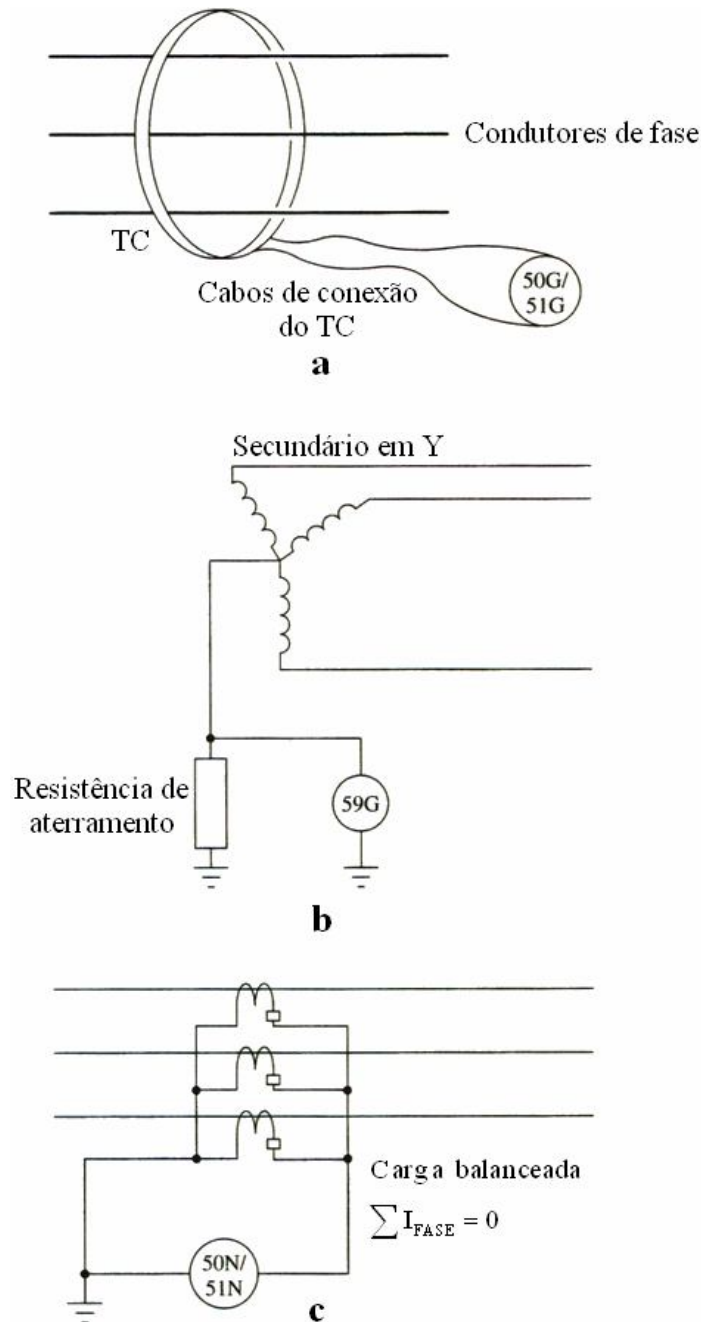


A figura 7 apresenta um diagrama unifilar de um transformador completamente protegido. Nota-se que a proteção de sobrecorrente de retaguarda do primário pode empregar TCs separados dos relés diferenciais (para aumentar a confiabilidade). Um bom número de diferentes proteções de falta a terra é mostrado na figura. Iniciando pelo topo, o relé 50N/51N no releamento de sobrecorrente primário é conectado da mesma maneira indicada na figura 6 para os relés de sobrecarga secundários.



**Figura 7: Diagrama unifilar de proteção de transformador.**

Um método alternativo de detecção de faltas a terra em sistemas em delta é mostrado na figura 8. A figura 8(a) mostra um transformador de corrente com uma abertura de tamanho suficiente para permitir que os condutores de todas as três fases (quatro se o neutro for incluído) passem por ele. Este transformador de corrente é denominado TC de sequência zero. A saída do TC deverá ser nula enquanto a soma das três correntes for nula, mas na ocorrência de uma falta a terra a soma das correntes não será mais nula o que será detectado pelo relé. Um relé de falta a terra 50G/51G é normalmente utilizado com o TC de sequência zero.



**Figura 8: Detecção de corrente a terra. (a) Detecção de faltas em sistemas não-aterrados utilizando TC de sequência zero. (b) Relé de sobretensão 59G para detecção de falta a terra. (c) Método de proteção de falta a terra com três TCs.**

Uma outra opção de detecção de falta a terra em um sistema estrela aterrado consiste no monitoramento da ligação do condutor neutro a terra. Nenhuma corrente deve circular neste condutor a menos que uma falta a terra se estabeleça. Resistores são utilizados no condutor de aterramento para limitar a tensão transitória devido ao carregamento da capacitância de linha em linhas longas de subtransmissão ou transmissão, e para limitar a corrente na ocorrência de uma falta de fase a terra. Reatores, os quais limitam as mudanças

bruscas na corrente, podem ser utilizados, mas possuem um custo mais elevado. Quando possível, o neutro solidamente aterrado é preferível. Se uma resistência de neutro é utilizada, um relé de sobretensão tipo 59G pode fornecer uma sensível detecção de falta a terra, como indica a figura 8(b). A corrente de neutro devida a uma falta a terra causa uma tensão sobre o resistor proporcional a corrente de falta.

Um método mais sensível de detecção de falta à terra que emprega TCs comuns é mostrado na figura 8(c). O relé 50N/51N conduz toda a corrente gerada a partir de um desequilíbrio.

O releamento de proteção contra falta a terra, especialmente em sistemas em delta, deve apenas fornecer um alarme, permitindo ao sistema continuar operando enquanto a falta é localizada, ao invés de acionar um disjuntor. Os relés de sobrecorrente acionam o disjuntor se ocorrer uma falta intensa o suficiente para causar problemas mais graves. Uma combinação de relés pode ser utilizada com um relé com curva característica de tempo inverso fornecendo um sinal de alarme e um relé instantâneo fornecendo um sinal de *trip* caso a falta seja suficiente para justificá-lo.

O releamento de proteção contra faltas a terra não pode ser tão sensível a ponto do desbalanceamento normal da carga causar sua operação, embora o excesso de sensibilidade seja raramente um problema. Existem vários esquemas de proteção de falta a terra, mas estes três são os mais comuns. Seu uso não é limitado à detecção de faltas a terra nos transformadores.

### **2.3.2. PROTEÇÃO DE BARRAMENTO**

A proteção diferencial se mostra bastante efetiva para a proteção contra faltas no barramento porque a diferença entre a corrente deixando o barramento através dos alimentadores e a corrente entrando no barramento a partir da linha de alimentação da subestação deve ser nula em qualquer instante. A proteção diferencial pode distinguir entre as faltas internas no barramento e as faltas externas, nos alimentadores. Uma falta em um alimentador pode resultar na saturação dos TCs, e o nível dc associado à falta pode agravar a situação. Portanto, um cuidado especial deve ser tomado no projeto do releamento diferencial de barramento para prevenir que faltas externas causem o acionamento do disjuntor que protege o barramento. Um esquema de proteção conjunta de barramento e transformador pode ser implementado nas subestações de pequeno porte. Nas subestações maiores os barramentos e o transformador devem possuir esquemas de proteção separados. A separação da proteção

dos barramentos e dos transformadores permite uma melhor isolamento da falta e um processo de localização mais fácil da mesma. Caso questões econômicas ou de disponibilidade de espaço requeiram a proteção conjunta de barramento e transformador então relés tipo CA-26 ou HU podem ser utilizados.

### 2.3.3. PROTEÇÃO DE ALIMENTADOR

O esquema básico de proteção de alimentador contra sobrecorrente é mostrado na figura 9. Consiste na utilização de relés de sobrecorrente 50/51 e 50N/51N (para proteção contra faltas a terra). Geralmente, este é o esquema de releamento padrão para os alimentadores. A proteção dos alimentadores, barramentos e transformadores deve ser coordenada usando os princípios discutidos anteriormente.

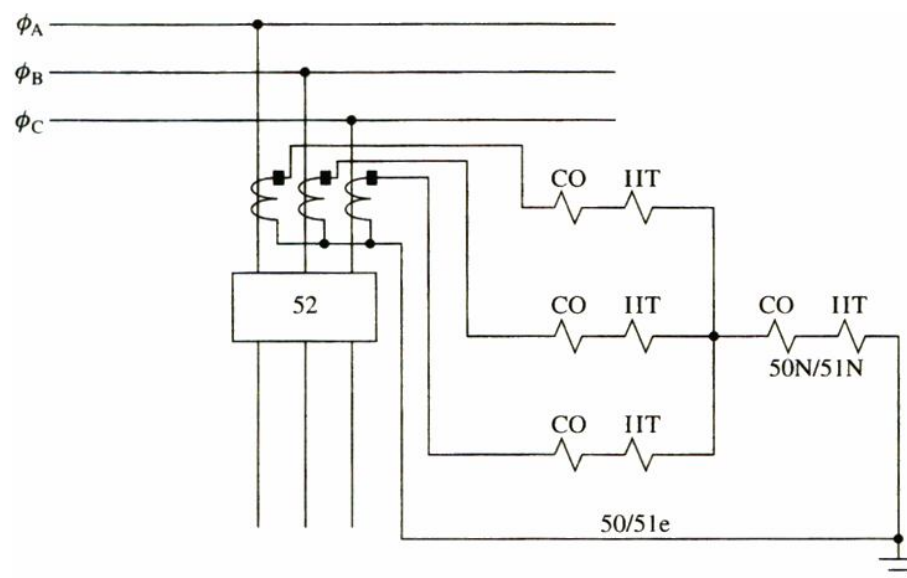


Figura 9: Proteção de sobrecorrente de alimentador de distribuição.

### 2.3.4. ATERRAMENTO

O aterramento da subestação é projetado primeiramente para o atendimento das condições de segurança e, secundariamente, para fornecer uma referência estável de tensão para a proteção dos sistemas. O sistema de aterramento de uma subestação consiste de uma matriz de aterramento feita com condutores nus de grande bitola, conectados em um padrão de grade, e enterrados abaixo da subestação. O perímetro da grade é conectado a hastes metálicas de cerca de 10 metros completamente enterradas. Os condutores da grade são distanciados em cerca de 6 metros, porém este espaçamento pode variar bastante com a

condutividade do solo. Em solos de maior condutividade pode ser utilizado um maior espaçamento dos condutores. O solo deve ser testado em cada local e suas características são utilizadas no projeto da malha de aterramento. Todas as estruturas da subestação são construídas dentro do perímetro da grade.

A cerca de proteção que delimita a subestação deve possuir dois condutores de aterramento conectados a ela a cada poucos metros. Um dos fios deve se prolongar cerca de 1 metro para fora da cerca e o outro cerca de 1 metro para dentro. Ambos os fios são conectados as hastes de aterramento a cada 15 metros. Isto é feito para garantir a proteção contra choques devido à tensão induzida na cerca pelos campos eletromagnéticos da subestação.

### **2.3.5. SERVIÇOS AUXILIARES**

Os serviços auxiliares visam manter as condições básicas de operação da subestação tais como iluminação do pátio e dos painéis e a alimentação dos dispositivos de controle dos equipamentos da subestação. Dentre os principais equipamentos utilizados destacam-se o transformador de serviço auxiliar, o qual alimenta os serviços auxiliares nas condições normais de funcionamento, podendo ser alimentado pela própria subestação ou por uma segunda subestação (alimentação com recurso); o conjunto retificador / banco de baterias cuja função consiste no fornecimento de corrente contínua para a subestação, em condição normal de operação (através do retificador) e em condições de emergência (através do banco de baterias). Os cálculos para os serviços auxiliares podem ser baseados na norma IEEE Std 485 – *“IEEE Recommended Practice for Sizing Large Lead Storage Batteries for Generating Stations and Substations”*.

## **2.4. AUTOMAÇÃO DE SUBESTAÇÕES**

### **2.4.1. EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS DE AUTOMAÇÃO DE SUBESTAÇÕES**

O sistema elétrico de potência, como é conhecido atualmente, começou a ser desenvolvido no início do século 20. Inicialmente, a geração destinava-se apenas ao suprimento de cargas locais, as quais consistiam basicamente em serviços de iluminação e transporte. A ocorrência de qualquer falha no sistema, seja na geração, nas linhas de transmissão ou nas conexões, implicava na interrupção do fornecimento de energia elétrica. Os consumidores não haviam aprendido a depender totalmente da eletricidade, uma vez que seu fornecimento não era completamente confiável. Com o aumento do consumo de energia

elétrica surgiu a necessidade de se encontrar meios de melhorar a confiabilidade do sistema. Usinas de geração e linhas de transmissão foram interconectados para criar caminhos alternativos para o fluxo de potência, e maiores tensões começaram a ser empregadas na transmissão de energia a longas distâncias. As primeiras subestações surgiram nos pontos nos quais as tensões eram transformadas ou onde as linhas de transmissão se encontravam. Estas subestações empregavam dispositivos de proteção que permitiam a isolação de faltas, tal que estas não atingissem todo o sistema. Eram necessárias equipes permanentes de operação nestes pontos importantes do sistema elétrico para que se pudesse monitorar e rapidamente responder a quaisquer problemas que eventualmente surgissem. Estas equipes se comunicavam com um sistema de gerenciamento central por quaisquer meios disponíveis, às vezes por telefone, para manter atualizadas as informações sobre as condições de operação do sistema. Este cenário, caracterizado por subestações operadas manualmente, manteve-se quase inalterado ao longo da primeira metade do século 20.

Com o aumento da necessidade de confiabilidade no fornecimento de energia elétrica, os custos associados a esta forma de operação tornaram-se uma parte significativa do custo total do fornecimento de energia elétrica. Novas tecnologias foram então desenvolvidas com o objetivo de permitir o monitoramento remoto e mesmo o controle dos parâmetros mais importantes do sistema. Estas tecnologias deram origem aos primeiros sistemas SCADA. Assim, os sistemas SCADA surgiram para reduzir, ou mesmo eliminar a necessidade de se manter equipes de operação permanentes nas subestações.

Os primeiros sistemas SCADA empregavam tecnologias oriundas dos sistemas de telefonia. As taxas de transferência de dados nestes sistemas iniciais eram muito baixas (cerca de 10 *bps*), e apenas quantidades muito pequenas de informação podiam ser processadas. Novas tecnologias de comunicação foram introduzidas paralelamente ao desenvolvimento dos sistemas SCADA. A invenção do modem (*MODulator/DEModulator*) permitiu o envio de informações digitais através de cabos projetados inicialmente para uso em telefonia. O desenvolvimento da eletrônica digital tornou mais rápido o fluxo de dados, o que possibilitou o monitoramento e controle de uma quantidade maior de parâmetros do sistema. Surgiram as primeiras RTUs (*Remote Terminal Units*) capazes de oferecer monitoramento e controle remoto de grandezas analógicas e discretas. A partir de 1970 as empresas líderes em tecnologia iniciaram o emprego de computadores em subestações com o objetivo de oferecer maior funcionalidade e capacidade de comunicação. Contudo as primeiras aplicações se depararam com a resistência do mercado em função de problemas de confiabilidade. A introdução do microprocessador Intel 4004 em 1971 iniciou um processo de crescente

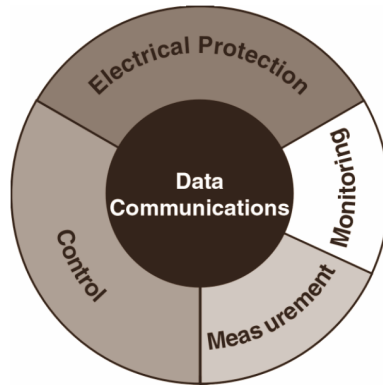
sofisticação no projeto das RTUs, o qual continua atualmente. Nos últimos anos, estes dispositivos sofreram uma grande redução em volume e um enorme aumento em funcionalidade.

As novas tecnologias baseadas em microprocessadores ofereciam uma significativa melhoria em funcionalidade associada a um baixo custo, contudo ainda não atendiam aos requisitos de alta confiabilidade e durabilidade exigidos pelas aplicações práticas. Houve, portanto um retardo na aceitação destas tecnologias em aplicações cruciais. Somente no início dos anos 80 foram introduzidos novos dispositivos integrados baseados em microprocessadores conhecidos como IEDs (*Intelligent Electronic Devices*), que substituíram seus predecessores, mas que utilizavam protocolos de comunicação proprietários. Rapidamente os IEDs adquiriram a função de conversão de dados para as unidades finais desejadas e passaram a ser empregados em algoritmos de controle local. Além disso, CLPs (Controladores Lógicos Programáveis) têm sido utilizados como IEDs ou RTUs, de forma que a distinção entre estes dispositivos tem se tornado pouco clara.

Os primeiros protocolos de comunicação SCADA eram proprietários. Contudo a tendência atual é a utilização de protocolos abertos, com especificações padronizadas (IEC 870-5 e IEC 61850). Isto se deve a necessidade de atualização dos sistemas com equipamentos de baixo custo e por vezes provenientes de fornecedores diferentes. Os sistemas abertos são baseados em processamento distribuído através de uma rede de dispositivos independentes, mas que seguem normas e padrões preestabelecidos com o intuito de garantir a interoperabilidade e a interconectividade entre eles.

#### **2.4.2. INTRODUÇÃO AOS SISTEMAS DE AUTOMAÇÃO DE SUBESTAÇÕES**

A implementação de um sistema de automação de subestação exige a obtenção de informação em tempo real do sistema (monitoramento) e a utilização de modernos dispositivos de controle e proteção. Na figura 10 ilustra-se graficamente o conceito de automação de subestação.



**Figura 10: Estrutura funcional de um sistema de automação de subestação. Extraído de *Power Systems Protection, Power Quality and Substation Automation*.**

Em termos gerais, um sistema de automação de subestação consiste nos seguintes componentes principais:

- Dispositivos de Proteção;
- Dispositivos de Controle;
- Medição;
- Monitoramento;
- Comunicação de Dados.

A proteção deve ser capaz de atuar independentemente do sistema de automação, embora seja parte deste sistema. O sistema de controle inclui ações de controle local e remoto. O controle local consiste em ações lógicas de controle realizadas localmente por diversos dispositivos. Este tipo de controle, que inclui intertravamentos, sequência de manobras e verificação de sincronismo, entre outras funções, deve funcionar mesmo sem o suporte do restante do sistema de automação. O controle remoto consiste em ações de controle acionadas à distância, por exemplo, abrir ou fechar um disjuntor. Isto elimina a necessidade de atuação humana nas operações de manobra, o que é significativamente vantajoso em situações de emergência. Ajustes de relés podem ser alterados através do sistema e a requisição de informações sobre a condição de operação dos equipamentos pode ser feita a partir dos centros de operação. Assim, é possível criar um ambiente de trabalho seguro e com reduzidas perdas de produção. Adicionalmente, o operador do terminal de controle SCADA, através de uma IHM (Interface Homem-Máquina), possui uma ampla visão do *status* do sistema, o que pode auxiliar enormemente na tomada de decisão.

A operação do sistema requer a obtenção de uma grande quantidade de informações em tempo real da subestação. A informação coletada deve ser disponibilizada em uma unidade de controle central, sendo ao mesmo tempo armazenada em um banco de dados. As medidas mais relevantes abrangem medidas elétricas (tensões, correntes, potências ativa e reativa, fator de potência, distorção harmônica, etc.), outras medidas analógicas, como por exemplo, a temperatura de motores e transformadores e o registro de eventos para análise de faltas e contingências. Esta grande quantidade de informação pode ajudar em estudos do sistema, tais como análise de fluxo de potência, planejamento de futura expansão e prevenção de distúrbios no sistema.

O monitoramento da subestação inclui o registro de sequência de eventos, o monitoramento de *status* e condições de operação dos dispositivos, incluindo informações de manutenção, ajustes de relés, etc. Esta informação pode ajudar na análise de faltas, determinando o que ocorreu, quando, onde e em que sequência. Pode ser usado para melhorar a eficiência do sistema de potência e da proteção. Procedimentos de manutenção preventiva podem ser programados a partir das informações obtidas pelo monitoramento.

O sistema de comunicação forma o núcleo do sistema de automação de subestações, constituindo o importante elo que unifica o sistema. Sem comunicação de dados, as funções de proteção e controle local não se alteram, e os dispositivos podem continuar armazenando dados, mas não estará em funcionamento um sistema de automação completo. A forma de comunicação depende da arquitetura utilizada, a qual por sua vez depende da forma de comunicação. A rede de comunicação deve constituir um subsistema inteligente a fim de realizar adequadamente as funções requeridas, não sendo, portanto, apenas uma interconexão de cabos ou fibra ótica.

Apenas como ilustração, na figura 11 apresenta-se a cópia da tela de um monitor de um sistema de automação de subestações real que permite observar algumas funcionalidades. Pode-se verificar que o sistema permite uma verificação direta de estados de relés, valores de tensões, correntes e potência, alarmes de faltas, etc.

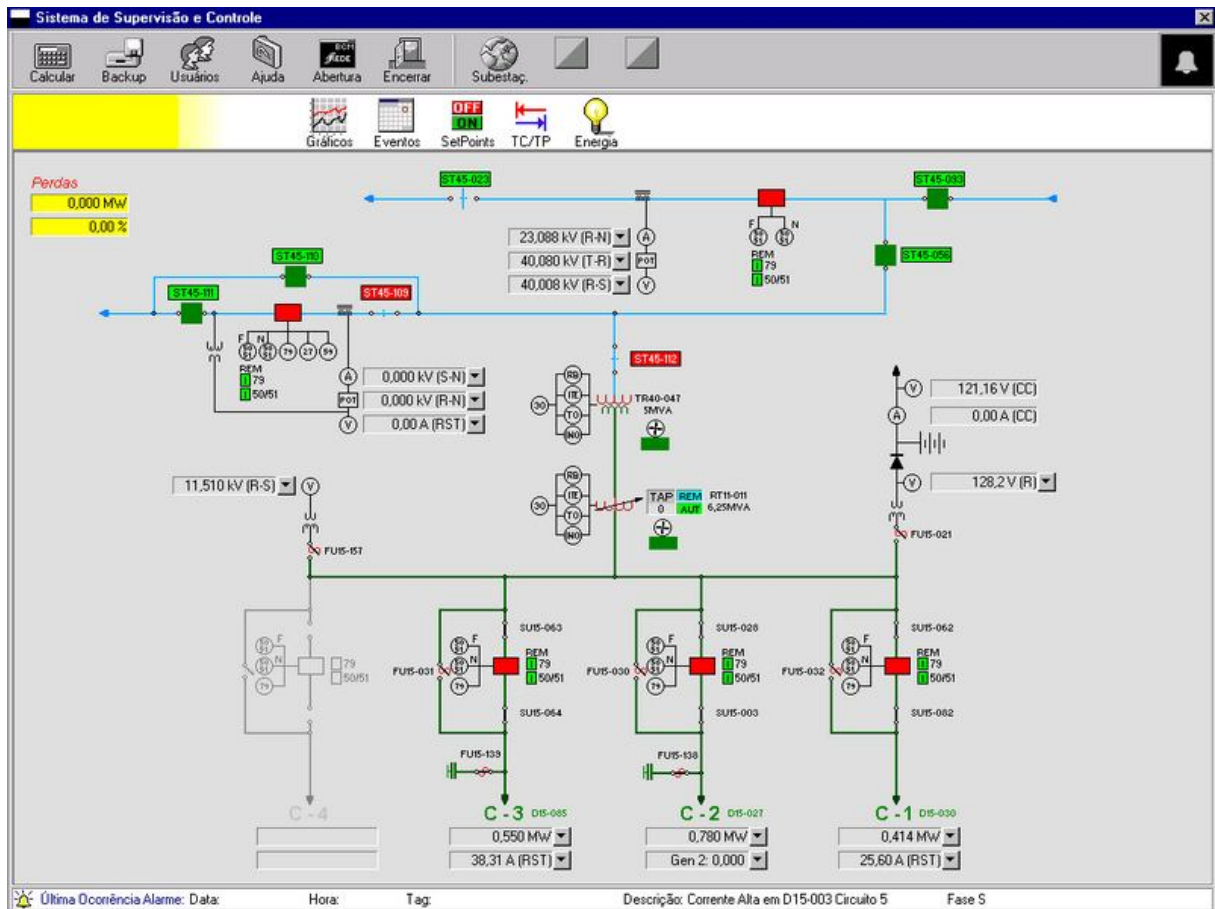


Figura 11: Ilustração de tela de um monitor de um sistema de automação de subestações.

### 2.4.3. SISTEMAS SCADA (SUPERVISORY, CONTROL AND DATA ACQUISITION)

O projeto de um sistema de automação de subestações deve ser precedido por uma análise cuidadosa das necessidades técnicas e recursos econômicos disponíveis para sua implementação. Atualmente, praticamente qualquer nível de automação pode ser obtido. O comportamento desejado do sistema de automação determina suas exigências funcionais. Este comportamento engloba os serviços, tarefas e funções que o sistema deve realizar. Em um sistema SCADA estas especificações incluem os pontos necessários de monitoramento e controle, a definição dos atrasos entre a identificação e a comunicação dos eventos, a precisão das medições analógicas e os níveis desejados de confiabilidade. A análise das exigências funcionais deve incluir o reconhecimento do ambiente físico, elétrico e funcional no qual o sistema de comunicação deve operar. Contudo a identificação destes itens não constitui uma tarefa simples.

Cabe aqui diferenciar um projeto de digitalização de subestação de um projeto de automação. No primeiro caso há apenas a substituição dos relés tradicionais, eletromecânicos e estáticos, por relés modernos com tecnologia digital. Ainda que esta simples substituição de

equipamentos possa agregar várias funcionalidades ao sistema, um projeto de automação de subestação envolve geralmente a aplicação de recursos avançados de inteligência artificial, com a utilização de relés estáticos ou digitais, com uma estrutura de automação mais abrangente. Um sistema de automação de subestação pode ser definido como um sistema integrado de gerenciamento, que envolve constante monitoramento, controle e proteção dos diversos equipamentos que constituem a subestação, visando a otimização de sua operação e manutenção, e minimizando a necessidade de intervenção humana nestes processos.

Atualmente os sistemas SCADA assumem a forma de *software* destinados ao tratamento de dados em tempo real (MAMEDE FILHO, 2007), sendo responsável pela aquisição dos dados analógicos e digitais provenientes da subestação. Um sistema SCADA tradicional apresenta uma topologia radial, com um controle geral centralizado e com centros de controle distribuídos pelas várias subestações. Os sistemas modernos são totalmente computadorizados, e as informações são disponibilizadas em tempo real nos terminais de operação ou enviadas aos níveis hierárquicos superiores através de redes de comunicação. As RTUs atuam como concentradores de dados, possuindo *links* de comunicação com os vários IEDs que operam dentro das subestações. Existem protocolos de comunicação padronizados para as RTUs. Nestes sistemas as informações podem ser acessadas com maior facilidade por outros centros interessados. Com a introdução dos protocolos de comunicação de rede baseados no IEC 61850 tornou-se possível suportar a comunicação simultânea com vários clientes localizados em diferentes regiões.

Os sistemas SCADA tradicionais se concentram na obtenção e processamento da informação em tempo real. Os sistemas atuais também armazenam a informação em bancos de dados, de forma a tornar possível o conhecimento do estado do sistema em qualquer tempo, o que facilita as análises de performance do sistema.

### 3. APLICAÇÃO DA DFT NA ANÁLISE DE SINAIS ELÉTRICOS

Os sistemas elétricos de potência são normalmente projetados para operar com formas de onda de tensão e corrente senoidais, com frequência fixa em 50 ou 60 Hz. Tais tensões e correntes podem ser completamente caracterizadas por apenas dois parâmetros: valor eficaz (ou amplitude) e ângulo de fase. Assim, sendo  $i(t) = I_m \cos(\omega t + \alpha)$  uma corrente puramente senoidal, sua representação fasorial, ou representação em notação de números complexos, pode ser obtida através da seguinte equação:

$$i(t) = \Re \left\{ I_m e^{j(\omega t + \alpha)} \right\} = \Re \left\{ \sqrt{2} \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j\alpha} \cdot e^{j\omega t} \right\} = \sqrt{2} \cdot \Re \left\{ \dot{I} \cdot e^{j\omega t} \right\} \quad (6)$$

sendo  $\dot{I} = (I_m / \sqrt{2}) e^{j\alpha}$  o fasor representativo desta corrente.

A representação fasorial, ou Transformada Fasorial (Nilsson, 2003), leva a função senoidal do domínio de tempo para uma representação equivalente no domínio de frequência. As vantagens dessa representação em notação de números complexos para o projeto e a análise de circuitos elétricos lineares são inumeráveis.

Quando a forma de onda da corrente deixa de ser perfeitamente senoidal sua representação fasorial torna-se inviável tomando-se como base apenas a equação 6. No que segue será apresentada uma generalização da representação fasorial de uma tensão ou corrente, com forma de onda periódica e não-senoidal, baseada no cálculo dos fasores representativos dos componentes harmônicos de tais grandezas.

#### 3.1. REPRESENTAÇÃO FASORIAL DE SINAIS CONTÍNUOS

Seja uma função contínua e periódica com período  $T$ , tal que  $s(t) = s(t + rT)$ , com  $r \in \mathbb{Z}$ . Se esta função satisfaz as condições de *Dirichlet*, o que em geral ocorre com as formas de onda encontradas nos sistemas elétricos de potência, então é possível representá-la por uma série de Fourier, como segue (HSU, 1972):

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cos(n\Omega t) + b_n \sin(n\Omega t) \right] \quad (7)$$

sendo os coeficientes  $a_0$ ,  $a_n$  e  $b_n$  dados por:

$$\begin{aligned}
 a_0 &= \frac{2}{T} \int_T s(t) dt \\
 a_n &= \frac{2}{T} \int_T s(t) \cos(n\Omega t) dt \\
 b_n &= \frac{2}{T} \int_T s(t) \text{sen}(n\Omega t) dt
 \end{aligned} \tag{8}$$

com  $\Omega = 2\pi/T$

A equação 7 garante que  $s(t)$  é matematicamente equivalente a soma ponderada de uma série infinita de funções senoidais cujas frequências são múltiplos inteiros da frequência fundamental  $\Omega$ , mais um componente dc. A equação 7 é denominada forma trigonométrica retangular da série de Fourier. Uma representação de Fourier mais compacta pode ser obtida utilizando-se a identidade de Euler:

$$\begin{aligned}
 \cos(n\Omega t) &= \frac{1}{2} (e^{jn\Omega t} + e^{-jn\Omega t}) \\
 \text{sen}(n\Omega t) &= \frac{1}{j2} (e^{jn\Omega t} - e^{-jn\Omega t})
 \end{aligned} \tag{9}$$

Substituindo (9) em (7) tem-se:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{jn\Omega t} \tag{10}$$

sendo  $c_n = \frac{1}{2}(a_n - jb_n) = \frac{1}{T} \int_T s(t) e^{-jn\Omega t} dt$ .

A equação 10 é denominada forma complexa da série de Fourier. Esta forma é operacionalmente mais útil e conceitualmente mais abrangente do que a apresentada na equação 7. Um gráfico no qual se marcam no eixo horizontal os múltiplos inteiros de  $\Omega$  e no eixo vertical os valores dos módulos dos coeficientes  $c_n$  é denominado espectro de amplitude da função periódica  $s(t)$ . Se no eixo vertical forem registrados os ângulos dos coeficientes  $c_n$  tem-se o espectro de fase de  $s(t)$ . Deve-se observar que, apesar de  $s(t)$  ser uma função contínua do tempo sua representação em série de Fourier é discreta, ou seja, constitui uma função da variável discreta  $n\Omega$ . Uma generalização da equação 10 pode ser facilmente obtida de forma a estender a representação de Fourier para funções não-periódicas (HSU, 1972), denominada Transformada de Fourier, a qual é dada pela equação 11. A Transformada de Fourier é seguramente uma das mais importantes ferramentas matemáticas de análise de sinais e sistemas lineares contínuos.

$$S(\Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j\Omega t} dt \quad (11)$$

Há ainda uma terceira forma de representação em série de Fourier, mais adequada às necessidades da Engenharia Elétrica (ORSINI, 1994), denominada forma trigonométrica polar, a qual é dada por:

$$s(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\Omega t + \alpha_n) \quad (12)$$

sendo  $C_0 = \frac{a_0}{2} = c_0$ ,  $C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} = 2|c_n|$  e  $\alpha_n = \text{tg}^{-1}\left(\frac{-b_n}{a_n}\right) = \arg(c_n)$ .

Tomando-se como base a equação 12, é possível generalizar a notação fasorial para incluir as formas de onda periódicas não-senoidais, como as correntes e tensões encontradas nos sistemas elétricos de potência submetidos a certas condições de falta ou sobrecarga. Assim, supondo-se uma corrente  $i(t)$  com componente harmônico de ordem não superior a  $M$ , esta corrente pode ser representada matematicamente por:

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^M I_n \cos(n\Omega t + \alpha_n) = I_0 + I_1 \cos(\Omega t + \alpha_1) + \dots + I_M \cos(M\Omega t + \alpha_M) \quad (13)$$

O vetor dado por:

$$\vec{I} = \left[ I_0 \quad \frac{I_1}{\sqrt{2}} e^{j\alpha_1} \quad \dots \quad \frac{I_M}{\sqrt{2}} e^{j\alpha_M} \right] \quad (14)$$

será considerado, ao longo deste trabalho, uma generalização da representação fasorial da corrente  $i(t)$  dada pela equação 13. Neste caso, definindo o conjugado de  $\vec{I}$  como:

$$\vec{I}^* = \left[ I_0 \quad \frac{I_1}{\sqrt{2}} e^{-j\alpha_1} \quad \dots \quad \frac{I_M}{\sqrt{2}} e^{-j\alpha_M} \right] \quad (15)$$

segue que o valor eficaz da corrente pode ser obtido por:

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\vec{I} \cdot (\vec{I}^*)^T} = \sqrt{I_0^2 + I_{\text{rms}}^2 + \dots + I_{\text{Mrms}}^2} \quad (16)$$

Ainda, supondo-se uma tensão periódica não-senoidal aplicada aos terminais de uma carga monofásica atravessada pela corrente dada pela equação 13, então, supondo que tal tensão não contenha harmônicos de ordem superior a  $M$ , podemos igualmente representá-la por um vetor, como segue:

$$\vec{V} = \left[ V_0 \quad \frac{V_1}{\sqrt{2}} e^{j\theta_1} \quad \dots \quad \frac{V_M}{\sqrt{2}} e^{j\theta_M} \right] \quad (17)$$

Fazendo:

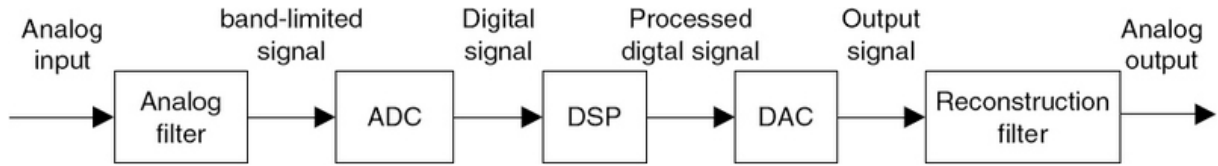
$$\dot{S} = \vec{V} \cdot (\vec{I}^*)^T = V_0 I_0 + \dot{V}_1 \dot{I}_1^* + \dots + \dot{V}_M \dot{I}_M^* \quad (18)$$

então a potência ativa entregue a carga pode ser obtida por:

$$P = \Re \{ \dot{S} \} = V_0 I_0 + V_{1rms} I_{1rms} \cos(\theta_1 - \alpha_1) + \dots + V_{Mrms} I_{Mrms} \cos(\theta_M - \alpha_M) \quad (19)$$

### 3.2. REPRESENTAÇÃO FASORIAL DE SINAIS DISCRETOS

Até este ponto foram consideradas apenas funções ou formas de onda contínuas. Em se tratando de sistemas discretos, ou sistemas digitais, há a necessidade de se adaptar as equações anteriores para possibilitar uma adequada representação de Fourier das grandezas elétricas de interesse. Em um sistema ou equipamento digital as formas de onda são representadas por sequências de amostras, geralmente tomadas em intervalos regulares de tempo. Se convenientemente efetuada, a amostragem de um sinal permite sua completa reconstituição no domínio do tempo, a partir das amostras que constituem sua representação no domínio discreto. Na figura 12 apresenta-se um diagrama de blocos no qual estão indicadas as principais etapas envolvidas no processamento digital de um sinal. Deve-se ressaltar que o processamento digital de um sinal qualquer precisa ser precedido de uma filtragem analógica que visa eliminar os componentes de frequência superior à metade da frequência de amostragem, que podem eventualmente estar presentes no espectro do sinal original. Assim, o teorema de Nyquist estabelece que, sendo  $f_s = 1/T_s$  a frequência de amostragem, e assumindo que o sinal amostrado é limitado em banda, com frequência máxima igual a  $f_M$ , então deve-se fazer  $f_s \geq 2 \cdot f_M$  para garantir que o sinal amostrado possa ser reconstruído unicamente a partir de suas amostras. Na prática utilizam-se taxas de amostragem superiores a de Nyquist. O filtro analógico, ou filtro anti-aliasing deve garantir essas condições.



**Figura 12: Processamento Digital de Sinais – Extraído de *Digital Signal Processing - Fundamentals and Applications* (TAN, 2008).**

Feita esta discussão inicial e considerando-se que os relés e medidores que fazem a interface entre o sistema elétrico de potência e os sistemas de proteção e medição são em geral digitais, a seguir apresentada-se uma alternativa para a obtenção dos fasores representativos das grandezas elétricas de interesse através de suas amostras, utilizando-se a DFT.

Seja  $s[n]$  uma sequência finita contendo  $N$  amostras de uma forma de onda analógica de corrente ou tensão. Esta sequência pode ser representada no domínio de frequência discreta através de sua Transformada de Fourier (de tempo discreto), definida como segue:

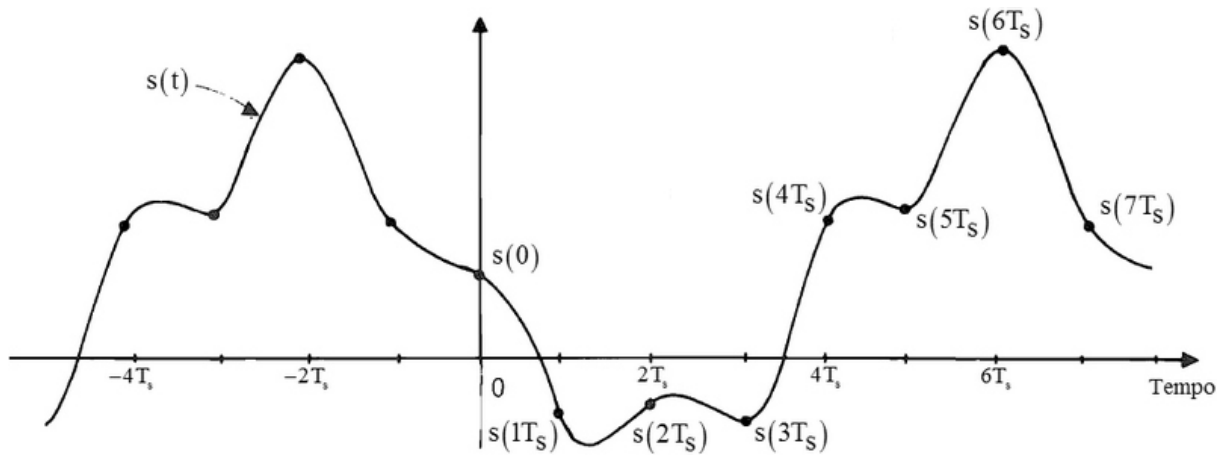
$$S(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s[n] e^{-j\omega n} \quad (20)$$

A equação 20 é análoga à equação 11, desempenhando o mesmo papel na análise e projeto de sistemas discretos lineares. A representação de  $s[n]$  no domínio de frequência discreta dá-se através da função contínua complexa  $S(e^{j\omega})$ , a qual é periódica em  $\omega$ , com período  $2\pi$  radianos (uma vez que  $e^{j\omega n}$  é periódica em  $\omega$ , com período  $2\pi$ , para todo  $n \in \mathbb{Z}$ ). A sequência  $s[n]$  é obtida de  $S(e^{j\omega})$  por meio da Transformada Inversa:

$$s[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} S(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega \quad (21)$$

O fato de  $S(e^{j\omega})$  ser um função contínua de  $\omega$  introduz certas dificuldades operacionais para o processamento digital de sinais, normalmente efetuado em dispositivos microprocessados dedicados, denominados DSPs (*Digital Signal Processors*). A DFT, por ser ela própria uma sequência ao invés de uma função contínua, constitui uma representação de Fourier mais adequada ao processamento digital de sinais. Assim, no que segue será suposto que a sequência  $s[n]$  contém  $N$  amostras de um sinal periódico contínuo  $s(t)$ , tomadas em um intervalo de tempo correspondente a 1 período completo de  $s(t)$ , tal que  $T_s = T/N$

corresponda ao período de amostragem, sendo  $T$  o período de  $s(t)$ . Na figura 13 ilustram-se essas hipóteses para uma forma de onda genérica, com  $N = 8$ .



**Figura 13: Forma de onda periódica amostrada.** Neste exemplo foram tomadas 8 amostras (indicadas por pontos sobre a curva) em um período. Adaptado de *Fast Transforms Algorithms, Analyses, Applications* (ELLIOTT; RAO, 1982).

Esta função pode ser representada por uma Série de Fourier Complexa como indicado na equação 10. Os coeficientes dessa expansão são dados então por:

$$c_k = \frac{1}{T} \int_T s(t) e^{-jk\Omega t} dt \quad (22)$$

A integral indicada na equação 22 pode ser aproximada numericamente, pelo método de Euler, como segue:

$$c_k \cong \frac{1}{T} \int_0^T s(t) e^{-jk\Omega t} dt \cong \frac{1}{T} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} s(nT_s) \cdot e^{-jk\Omega nT_s} \cdot T_s \quad (23)$$

com  $\Omega = 2\pi/T$  e  $T_s = T/N$ .

Evidentemente a aproximação dada pela equação 23 será tanto melhor quanto maior for o valor de  $N$ . A equação 23 pode ainda ser colocada na seguinte forma:

$$c_k \cong \frac{1}{T} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} s[n] \cdot e^{-jk \frac{2\pi}{T} n \frac{T}{N}} \cdot \frac{T}{N} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} s[n] \cdot e^{-jk \frac{2\pi}{N} n} \quad (24)$$

sendo  $s[n] = s(nT_s)$

A DFT da sequência  $s[n]$  é definida formalmente por (ORSINI, 1994):

$$S[k] = \sum_{n=0}^{N-1} s[n] e^{-jk(2\pi/N)n} \quad (25)$$

Assim, das equações 24 e 25 segue que os coeficientes complexos da expansão em Série de Fourier de uma forma de onda contínua podem ser aproximadamente obtidos através da aplicação da DFT a uma sequência formada por amostras de tal forma de onda, tomadas em um período. Para que a aproximação dada pela equação 24 possa ser substituída por uma igualdade as seguintes condições devem ser satisfeitas (ORSINI, 1994):

1. O sinal amostrado  $s(t)$  deve ser limitado em banda, conforme já discutido, e amostrado com taxa superior à de Nyquist, ou seja,  $\omega_s > 2 \cdot \omega_M$ , sendo  $\omega_M$  a frequência angular máxima presente no sinal;
2. Para sinais periódicos, a duração da amostragem deve ser igual a um número inteiro de períodos do sinal.

Satisfeitas estas condições é possível demonstrar que (ORSINI, 1994):

$$\begin{cases} S[k] = N \cdot c_k \\ S[N-k] = N \cdot c_{-k} \end{cases} \quad (k = 0, 1, 2, \dots, M) \quad (26)$$

A DFT pode ser interpretada como uma amostragem em frequência, feita em intervalos regulares de  $2\pi/N$  radianos, da Transformada de Fourier discreta da sequência original (OPPENHEIM et al., 1999), ou seja:

$$S[k] = S(e^{j\omega}) \Big|_{\omega = \frac{2\pi}{N}k} \quad (27)$$

A equação 27 também permite observar o caráter periódico de  $S[k]$  (devido à periodicidade de  $S(e^{j\omega})$ ). A reconstituição da sequência  $s[n]$  a partir de  $S[k]$  pode ser obtida pela IDFT (*Inverse Discrete Fourier Transform*), como segue:

$$s[n] = \sum_{k \in \langle N \rangle} S[k] e^{jk(2\pi/N)n} = \sum_{k=0}^{N-1} S[k] e^{jk(2\pi/N)n} \quad (28)$$

Assim, observadas as condições descritas anteriormente, é possível determinar os fasores representativos de uma forma de onda periódica de tensão ou corrente a partir de suas amostras, através da seguinte sequência de operações:

- i. Determinação da DFT através da equação 25;
- ii. Determinação dos coeficientes da Série Complexa de Fourier a partir da equação 26;
- iii. Obtenção dos fasores através das relações:  $C_0 = c_0$ ,  $C_k = 2|c_k|$  e  $\alpha_k = \arg(c_k)$ , sendo:

$$s(t) = C_0 + \sum_{k=1}^M C_k \cos(k\Omega t + \alpha_k) \quad (29)$$

Neste caso, o vetor:

$$\vec{S} = \left[ C_0 \quad \frac{C_1}{\sqrt{2}} e^{j\alpha_1} \quad \dots \quad \frac{C_M}{\sqrt{2}} e^{j\alpha_M} \right] = \left[ c_0 \quad \sqrt{2} |c_1| e^{j\arg(c_1)} \quad \dots \quad \sqrt{2} |c_M| e^{j\arg(c_M)} \right] \quad (30)$$

constitui uma generalização da representação fasorial de  $s(t)$  obtida diretamente da aplicação da DFT a suas amostras. Considerando-se a equação 26 tem-se finalmente:

$$\vec{S} = \frac{1}{N} \left[ S[0] \quad \sqrt{2} |S[1]| e^{j\arg(S[1])} \quad \dots \quad \sqrt{2} |S[M]| e^{j\arg(S[M])} \right] \quad (31)$$

Na prática a equação 25 é calculada através de algoritmos otimizados, ou algoritmos de Transformada Rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transforms*). Estes algoritmos permitem reduzir drasticamente o número de cálculos (produtos e somas) necessários para a determinação dos coeficientes da DFT. Uma discussão detalhada de tais algoritmos pode ser encontrada em (ELLIOTT; RAO, 1982). Pode-se demonstrar que, dada uma sequência de  $N$  pontos, o cálculo dos coeficientes da DFT através da equação de definição exige  $N^2$  multiplicações (e  $N^2$  adições) no campo complexo, contudo, por meio da FFT é possível reduzir esse número para apenas  $(N/2)\log_2(N)$ . Na realidade, o desenvolvimento da FFT permitiu a aplicação da DFT nas mais diversas áreas, tais como, análise espectral de sinais, aplicações médicas, processamento de sinais de radar, processamento digital de imagens, análise de vibrações mecânicas e análise e reconhecimento de padrões, entre várias outras. Além disso, processadores digitais baseados na FFT foram desenvolvidos, podendo ser atualmente encontrados modelos com baixo custo e elevada eficiência para aplicações que exijam processamento em tempo real, tais como os modernos relés digitais utilizados nas subestações de distribuição de energia elétrica.

## 4. INTRODUÇÃO ÀS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Uma Rede Neural Artificial (RNA) é formada pela interconexão de elementos simples de processamento, denominados neurônios, através de um grande número de conexões, denominadas sinapses. Nesta estrutura, cada neurônio normalmente possui várias entradas, que após processadas, geram uma única saída, a qual pode ser utilizada como uma entrada ponderada, através de uma conexão sináptica, para vários outros neurônios. Cada sinapse é associada a um peso que determina sua força no processo de decisão de disparo do neurônio, controlando, desta forma, os estímulos. Uma definição mais formal é encontrada em (HAYKIN, 2001): *“Uma rede neural é um processador maciçamente paralelamente distribuído constituído de unidades de processamento simples, que tem a propensão natural para armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para uso”*.

As RNAs possuem a habilidade de apreender e generalizar. São capazes de efetuar complexos mapeamentos de entrada-saída (HAYKIN, 2001), através de um processo de treinamento no qual é fornecido à rede um conjunto de amostras de treinamento rotuladas. Neste paradigma de aprendizagem, conhecido como aprendizagem supervisionada, a cada sinal de entrada (único) deve ser associado um sinal de saída correspondente (saída desejada). Um algoritmo de ajuste dos pesos sinápticos é responsável pela modificação dos pesos de tal forma a reduzir a diferença entre a saída real da rede e a saída desejada. O treinamento da rede é repetido para vários padrões do conjunto de treinamento até que um estado estável (com poucas modificações sinápticas) seja atingido.

RNAs são capazes de lidar com não-linearidades (quando formadas por neurônios não-lineares). Apresentam adaptabilidade, ou seja, a capacidade de ajustar seus pesos sinápticos de forma a responder corretamente quando sujeitas a modificações das condições operativas do ambiente. Esta característica possibilita sua utilização em ambientes não-estacionários (como o estado de um alimentador de sistema de distribuição de energia). Além disso, constituem sistemas tolerantes às falhas, no sentido de que a perda de alguns neurônios e/ou conexões sinápticas não deve degradar severamente a resposta global da rede.

As redes neurais artificiais são baseadas em modelos inspirados na estrutura neural de organismos biológicos, os quais adquirem conhecimento através da experiência. Contudo, enquanto uma rede neural artificial pode conter centenas ou milhares de unidades de processamento, o cérebro de um mamífero pode ter muitos bilhões de neurônios.

Redes Neurais Artificiais estão sendo atualmente aplicadas na solução de uma grande variedade de problemas nos mais diversos campos: automação e controle adaptativo,

otimização de processos, diagnóstico médico, sistemas de apoio à tomada de decisão, análise e processamento de sinais, robótica, classificação de dados, filtros, análise de imagens e voz, avaliação de crédito e técnicas de análise de mercados financeiros, entre numerosas outras. Em sistemas elétricos de potência sua aplicação tem aumentado significativamente nos últimos anos. Problemas como a previsão de cargas elétricas (ALTRAN, 2005), análise de estabilidade transitória (SILVEIRA, 2003, LOTUFO, 2004, LOPES, 2005), proteção de transformadores de potência (SEGATTO; COURY, 2008) e diagnóstico de faltas (BO et al., 1997, FLÓREZ et al., 2008, DECANINI, 2008, OLESKOVICZ et al., 2003, MORETO, 2005, CARDOSO JR; ROLIM; ZÜRN, 2004, SILVA et al., 2007), tem sido abordados e resolvidos com vantagens através da utilização de RNAs.

As discussões deste capítulo estão relacionadas às necessidades da aplicação das redes neurais artificiais neste trabalho. Assim, o estudo apresentado destaca os pontos mais importantes no contexto de reconhecimento de padrões usando-se redes neurais do tipo MLP (*Multilayer Perceptron*).

#### 4.1. NEURÔNIOS ARTIFICIAIS

A unidade básica de processamento de informação em uma rede neural artificial é o neurônio (figura 14). Basicamente, um neurônio recebe um sinal de entrada proveniente do meio externo e efetua sobre ele um processamento, geralmente não-linear, dado pela seguinte equação:

$$y_k = \varphi(v_k) = \varphi\left(\sum_{i=0}^m w_{ki}x_i\right) \quad (32)$$

sendo  $x_0 = 1$  e  $w_{k0} = b_k$  uma entrada externa denominada *bias*, cuja função é alterar a entrada líquida aplicada à rede.

Na figura 14, a variável  $v_k$ , denominada campo local induzido, representa o potencial de ativação do neurônio  $k$ . A decisão de disparo do neurônio é normalmente representada por uma função de ativação, denotada por  $\varphi(\cdot)$  na figura 14. Esta função restringe a saída do neurônio para valores entre 0 e 1, ou entre -1 e 1, e é necessária para a introdução da não-linearidade na rede. Existem diversas funções de ativação, sendo as principais a função de limiar, função linear (por partes), função sigmoide e função tangente hiperbólica.

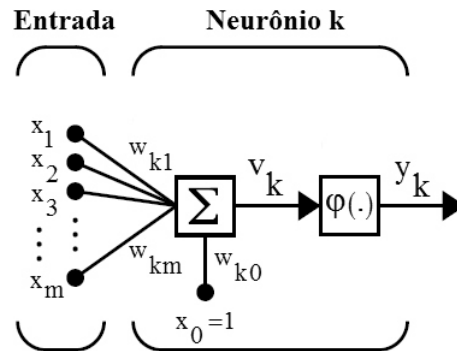


Figura 14: Modelo de um neurônio. Adaptado de *Neural Network Toolbox For Use with MATLAB®* (DEMUTH; BEALE, 1998).

A função de limiar, cujo gráfico é apresentado na figura 15 é dada por:

$$y_k = \begin{cases} 1 & \text{se } v_k \geq 0 \\ 0 & \text{se } v_k < 0 \end{cases} \quad (33)$$

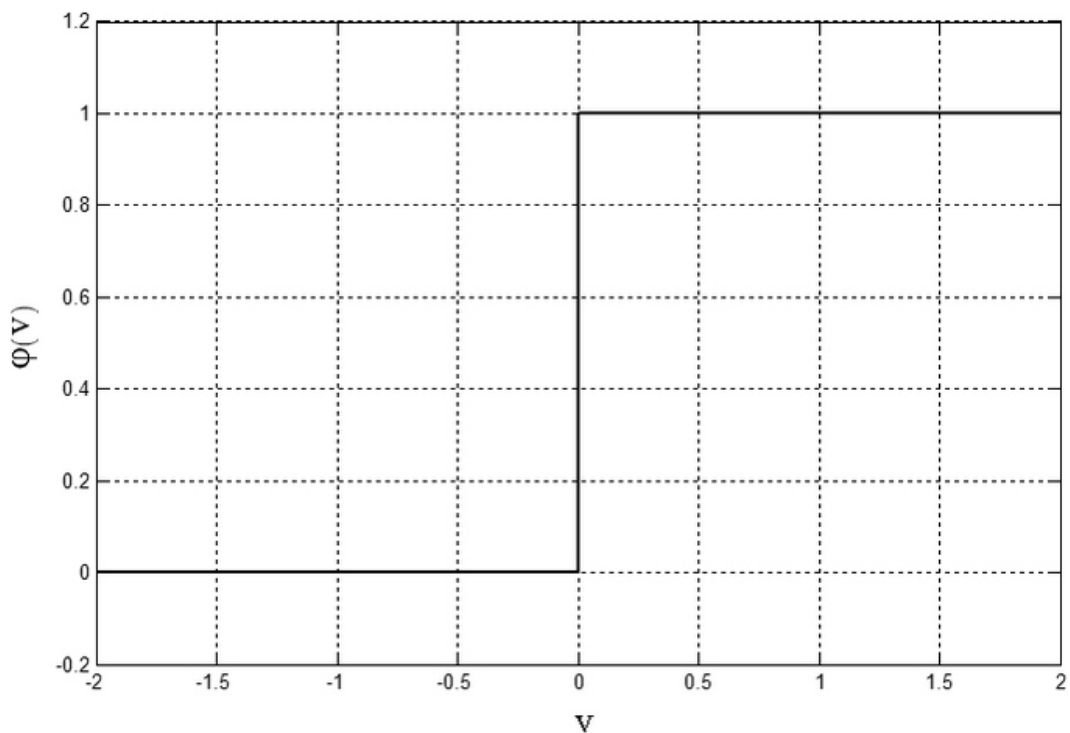


Figura 15: Função de limiar (ou de *Heaviside*).

A função linear por partes, cujo gráfico é apresentado na figura 16 é dada por:

$$y_k = \begin{cases} 1, & \text{se } v_k \geq \frac{1}{2} \\ v_k + \frac{1}{2} & \text{se } -\frac{1}{2} < v_k < \frac{1}{2} \\ 0, & \text{se } v_k \leq -\frac{1}{2} \end{cases} \quad (34)$$

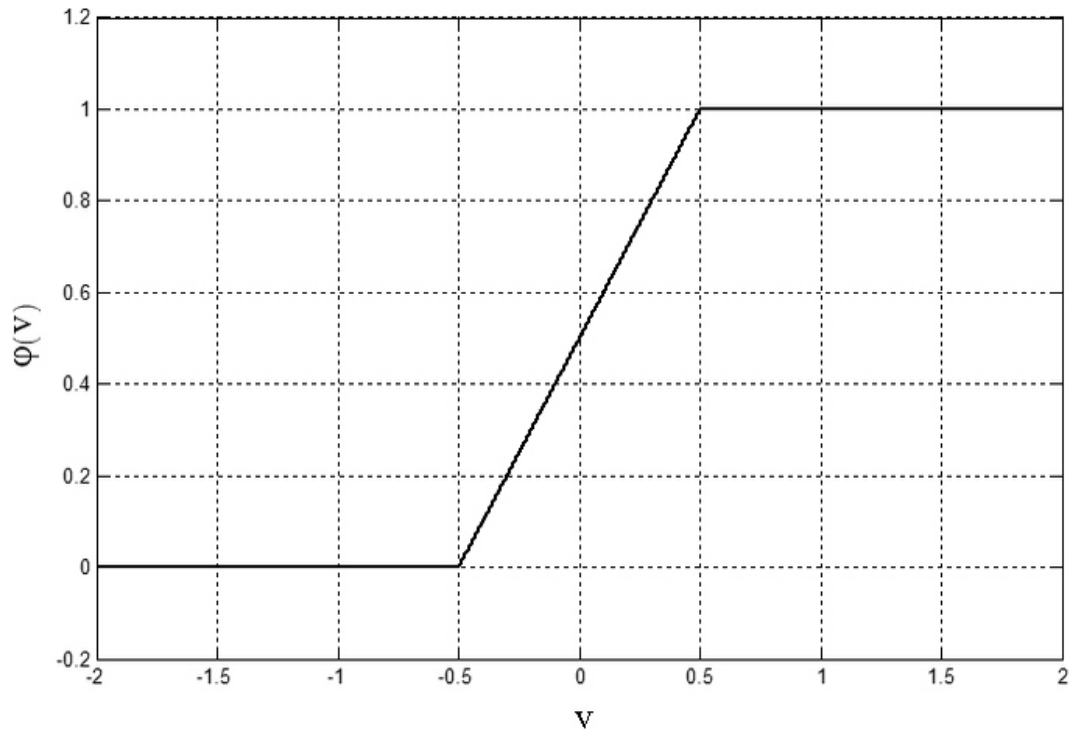


Figura 16: Função linear por partes.

A função sigmoide, cujo gráfico é apresentado na figura 17 é dada por:

$$y_k = \frac{1}{1 + e^{-av_k}} \quad (35)$$

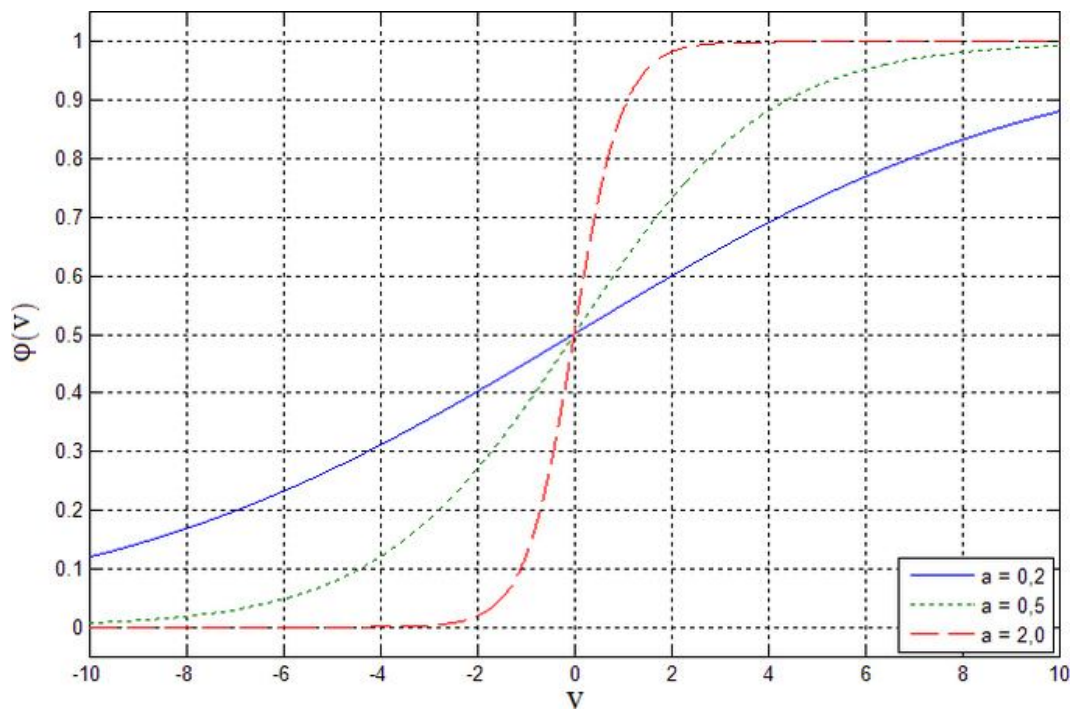


Figura 17: Função sigmoide, para 3 diferentes valores de  $a$ .

Esta é a função mais utilizada na construção de redes neurais, pois além de ser derivável e estritamente crescente, possui um balanceamento adequado entre o componente linear e o não-linear.

A função tangente hiperbólica, cujo gráfico é apresentado na figura 18 é dada por:

$$y_k = \frac{e^{av_k} - e^{-av_k}}{e^{av_k} + e^{-av_k}} \quad (36)$$

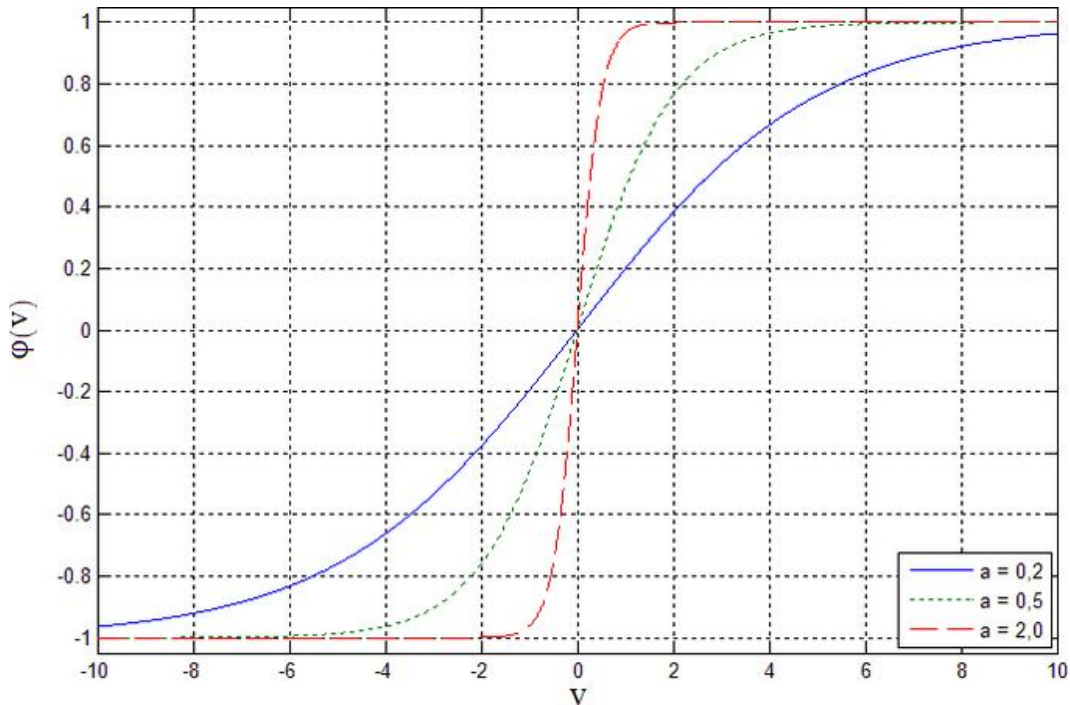


Figura 18: Função tangente hiperbólica, para três diferentes valores de  $a$ .

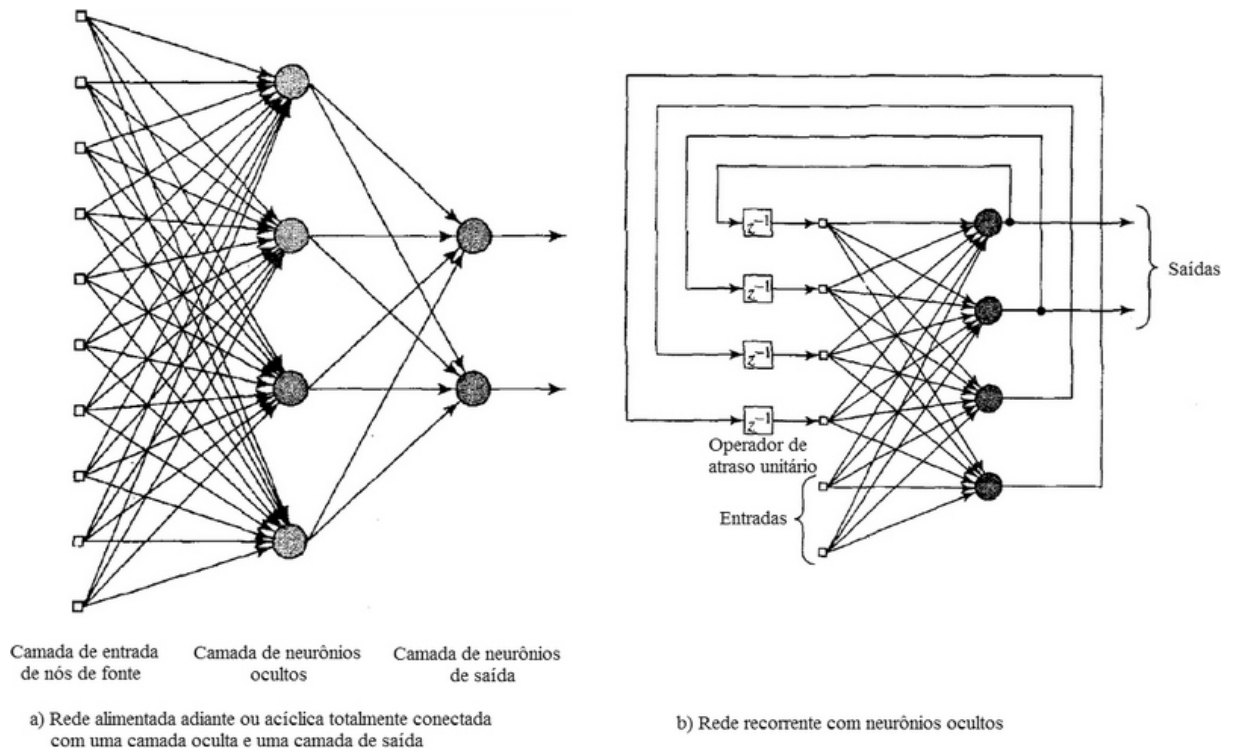
Esta função possui características similares à função sigmoide e permite que a saída do neurônio  $k$  varie entre -1 e 1.

O coeficiente  $a$  (figuras 31 e 32) é o parâmetro de inclinação das funções sigmoide e tangente hiperbólica.

## 4.2. ARQUITETURAS DE REDE

A escolha da arquitetura de uma RNA envolve a definição de alguns parâmetros importantes: número de camadas, número de neurônios por camada, tipos de conexão entre neurônios e a topologia da rede. Quanto ao número de camadas as redes podem ser de camada única, com apenas um neurônio entre qualquer par entrada-saída, ou de múltiplas camadas, com mais de um neurônio entre algum par entrada-saída. Em relação ao tipo de conexão entre os neurônios as redes podem ser acíclicas (ou *feedforward*), nas quais não há realimentação

das saídas, ou cíclicas (ou recorrentes), nas quais pelo menos uma saída é realimentada para a rede. Assim, pode-se afirmar que existem basicamente três classes de arquiteturas de rede: redes acíclicas com camada única, redes acíclicas com múltiplas camadas e redes recorrentes. Na figura 19 ilustra-se as duas últimas classes.

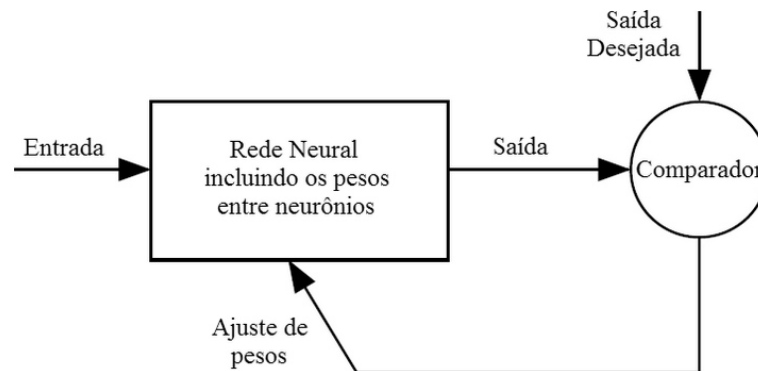


**Figura 19: Duas classes de redes neurais artificiais. a) Rede acíclica de múltiplas camadas. b) Rede recorrente.**

Na figura 19-a existem duas camadas de neurônios, com 4 neurônios na camada intermediária (primeira camada oculta) e 2 neurônios na camada de saída, além de 10 nós de fonte. Redes como esta, com uma ou mais camadas ocultas, são capazes de extrair estatísticas de ordem elevada dos dados de entrada (HAYKIN, 2001). Os sinais de saída da última camada constituem a resposta da rede para um dado padrão de entrada. Redes como a apresentada na figura 19-a são ditas totalmente conectadas, ou seja, a saída de um dos neurônios de uma camada qualquer da rede (exceto a de saída) é conectada a todos os neurônios da camada seguinte. A figura 19-b ilustra uma rede recorrente com 4 laços de realimentação, incluindo as duas saídas. Estas redes, também denominadas autoassociativas são muito úteis em tarefas que envolvam a recuperação de padrões.

### 4.3. APRENDIZADO

A principal característica das RNAs é a capacidade de aprender através de exemplos e efetuar generalizações. Em geral, o aprendizado se dá através do ajuste dos pesos das ligações sinápticas entre os neurônios, sendo que os diversos algoritmos de aprendizagem, diretamente associados à arquitetura de cada tipo de rede, diferem basicamente na forma como tal ajuste é efetuado. “A utilização de uma RNA na solução de uma tarefa passa inicialmente por uma fase de aprendizagem, quando a rede extrai informações relevantes de padrões de informação apresentados para ela, criando assim uma representação própria para o problema” (BRAGA et al., 2000). Existem algoritmos de treinamento que alteram, além dos pesos sinápticos, a própria topologia da rede. Assim, existem basicamente dois paradigmas de treinamento: treinamento supervisionado e treinamento não-supervisionado. No primeiro caso é utilizado um banco de dados de treinamento, constituído por um conjunto de pares entrada-saída, ou padrões de treinamento, nos quais é associado a cada sinal de entrada uma saída correspondente desejada para a rede neural, como ilustra-se na figura 20. No segundo caso, os ajustes nos pesos sinápticos são efetuados levando-se em conta apenas os padrões de entrada.

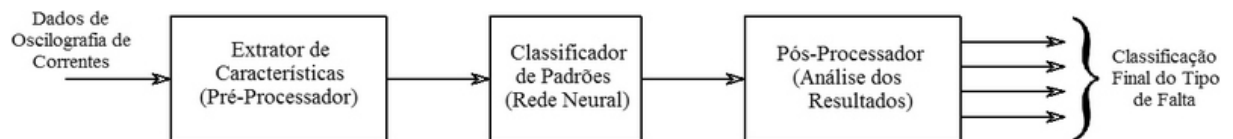


**Figura 20: Aprendizado supervisionado.**

Uma vez definida a arquitetura da rede e efetuado o respectivo treinamento, pode-se dizer que o conhecimento adquirido pela rede fica armazenado nos parâmetros livres da mesma. A fim de garantir uma representação adequada do conhecimento no interior da rede neural, algumas regras devem ser observadas (HAYKIN, 2001): entradas similares de classes similares devem produzir representações similares no interior da rede, devendo ser classificadas como pertencentes à mesma categoria; entradas pertencentes a classes diferentes devem ser associadas a representações bem diferentes no interior da rede; um elevado número de neurônios devem estar envolvidos na representação de características importantes; deve ser

incluída informação prévia e invariâncias no projeto da rede de forma a simplificar o seu projeto.

A aplicação de RNAs em problemas de engenharia envolve, em geral, a observação de alguns pontos importantes. Problemas de alta complexidade devem ser decompostos em subproblemas menores, atribuindo-se às redes apenas a solução das tarefas que coincidem com suas capacidades. O trabalho da rede deve ser, tanto quanto possível, aliviado através da aplicação de blocos de pré-processamento e/ou pós-processamento que possibilitem a aplicação de redes de menores, altamente especializadas, as quais requerem um número menor de dados para o treinamento, apresentam respostas mais rápidas e menores custos de implementação. Na figura 21 sugere-se uma abordagem do problema de classificação de faltas em um alimentador aéreo de sistema de distribuição de energia, através do emprego de redes neurais artificiais especializadas na classificação dos diversos tipos de falta mediante a análise de características previamente extraídas das correntes medidas na saída da subestação.



**Figura 21: Classificador de Padrões. Baseado em *Neural Networks - A Comprehensive Foundation*.**

#### 4.3.1. PERCEPTRONS DE MÚLTIPLAS CAMADAS

São redes acíclicas de múltiplas camadas, cujos neurônios apresentam função de ativação não-linear, compostas por uma camada de entrada de nós de fonte, uma ou mais camadas ocultas de nós computacionais e uma camada de saída de nós computacionais. Estas redes são treinadas através de um algoritmo supervisionado denominado algoritmo de retropropagação de erro (*back-propagation*), baseado na regra de aprendizagem por correção de erro. Este algoritmo apresenta duas etapas distintas. Na primeira etapa é apresentado à rede um padrão de entrada, o qual se propaga através da rede, camada por camada, até produzir a resposta final da rede (saídas dos neurônios da última camada). Na segunda etapa, que se realiza da última para a primeira camada, os pesos dos neurônios de cada camada são ajustados de acordo com uma regra de correção de erro. O sinal de erro é definido como a diferença entre a saída real da rede e uma saída desejada. O objetivo é fazer com que a saída da rede se aproxime gradativamente da saída desejada. Em linhas gerais, este algoritmo pode ser implementado como segue (HAYKIN, 1999).

#### 4.3.1.1. Neurônios da camada de saída

O sinal de erro para um neurônio qualquer da camada de saída é dado por:

$$e_j(n) = d_j(n) - y_j(n) \quad (37)$$

Na equação 37,  $d_j(n)$  é a saída desejada para o neurônio em questão e  $y_j(n)$  é a saída real do neurônio, produzida em resposta ao  $n$ -ésimo padrão de entrada aplicado a camada de nós de fonte. O valor instantâneo da energia total do erro, para o  $n$ -ésimo padrão de entrada, é dado por:

$$\xi(n) = \frac{1}{2} \sum_{j \in C} e_j^2(n) \quad (38)$$

Na equação 38, o somatório é feito sobre todos os neurônios de saída da rede. Os ajustes dos pesos devem ser efetuados de acordo com os respectivos erros, calculados para cada padrão apresentado à rede. Mas, conforme pode ser visto na figura 22, a saída do neurônio  $j$  é obtida por:

$$y_j(n) = \varphi_j(v_j(n)), \quad \text{sendo} \quad v_j(n) = \sum_{i=0}^m w_{ji}(n) y_i(n) \quad (39)$$

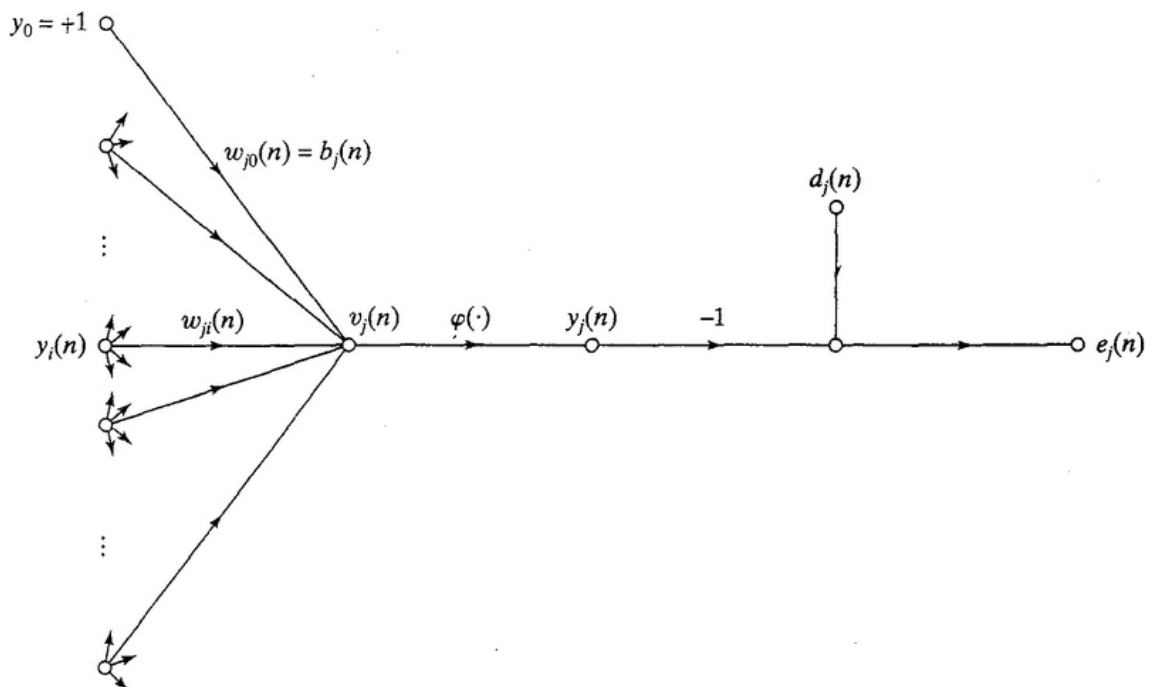


Figura 22: Grafo de fluxo de sinal ressaltando os detalhes do neurônio de saída  $j$ . Reproduzido de *Neural Networks - A Comprehensive Foundation*.

O algoritmo de retropropagação efetua uma correção no peso sináptico  $w_{ji}(n)$ , associado a uma ligação sináptica entre um neurônio oculto  $i$  e o neurônio de saída  $j$ , proporcional a  $\partial\xi(n)/\partial w_{ji}(n)$ , ou, aplicando a regra da cadeia:

$$\frac{\partial\xi(n)}{\partial w_{ji}(n)} = \frac{\partial\xi(n)}{\partial e_j(n)} \frac{\partial e_j(n)}{\partial y_j(n)} \frac{\partial y_j(n)}{\partial v_j(n)} \frac{\partial v_j(n)}{\partial w_{ji}(n)} \quad (40)$$

sendo, o ajuste no em  $w_{ji}(n)$ , para o  $n$ -ésimo padrão de entrada, dado por:

$$\Delta w_{ji}(n) = -\eta \frac{\partial\xi(n)}{\partial w_{ji}(n)} = \eta \delta_j(n) y_i(n) \quad (41)$$

sendo:

$$\delta_j(n) = -\frac{\partial\xi(n)}{\partial v_j(n)} = e_j(n) \phi'_j(v_j(n)) \quad (42)$$

Na equação 42,  $\delta_j(n)$  é denominado gradiente local, o qual fornece a direção para as modificações nos pesos sinápticos que levam à minimização da função de custo representada por  $\xi(n)$ . O parâmetro  $\eta$  é denominado taxa de aprendizagem. Logo, o gradiente local para um neurônio da camada de saída depende do erro deste neurônio e da derivada da função de ativação calculada no campo local induzido em resposta ao  $n$ -ésimo padrão de entrada (utilizado para o ajuste em  $w_{ji}(n)$ ). Assim, é relativamente simples a determinação dos ajustes de pesos sinápticos dos neurônios da camada de saída da rede.

#### 4.3.1.2. Neurônios Ocultos

O ajuste dos pesos sinápticos dos neurônios ocultos constitui um problema mais complexo, tendo em vista que não há uma definição clara do erro para tais neurônios. Contudo, os pesos sinápticos de tais neurônios também contribuem para o erro final da rede. Este problema é denominado problema de atribuição de crédito, e sua solução consiste em atribuir a tais neurônios um sinal de erro dependente dos sinais de erro de todos os neurônios aos quais ele esteja conectado, pertencentes a uma camada imediatamente a sua direita (retropropagação do erro). Na figura 23 o neurônio  $j$  pertence a uma camada oculta imediatamente anterior a camada de saída, na qual encontra-se o neurônio  $k$ .

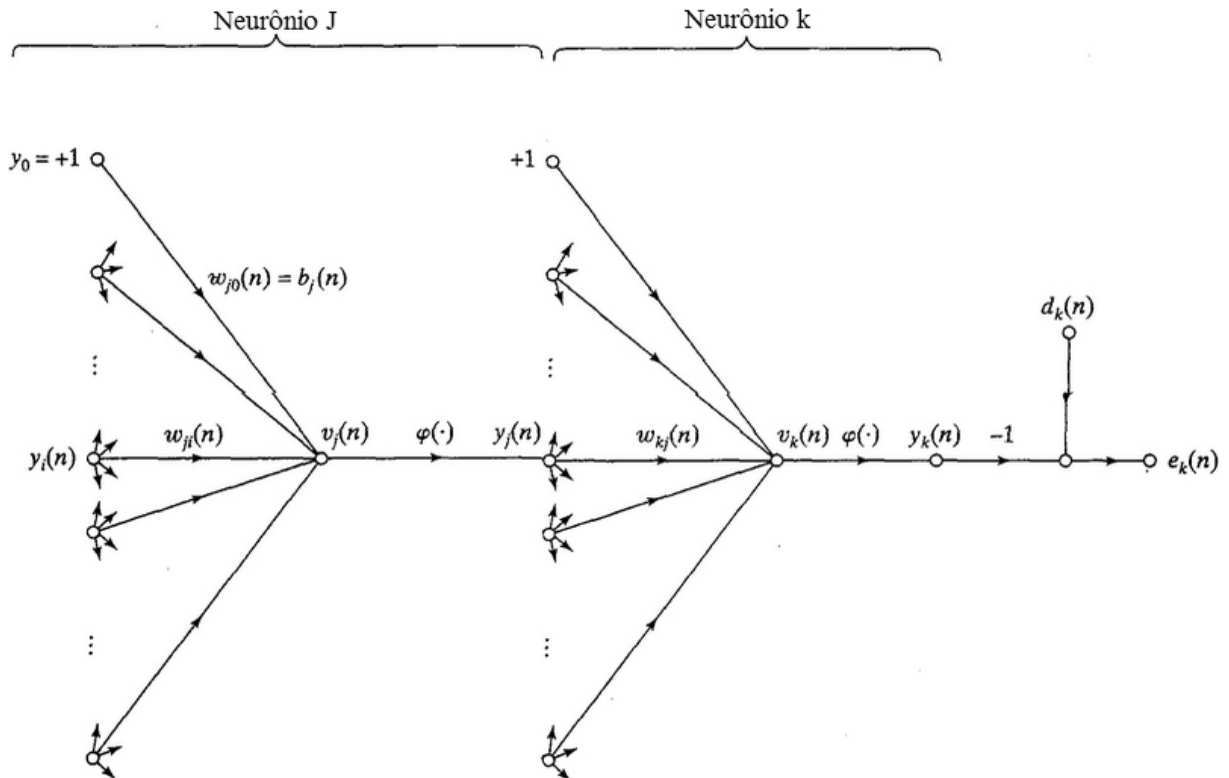


Figura 23: Detalhes do neurônio de saída k, conectado ao neurônio oculto j. Reproduzido de *Neural Networks - A Comprehensive Foundation*.

Neste caso, o erro do neurônio k é  $e_k(n) = d_k(n) - y_k(n)$ . O gradiente local do neurônio k é dado simplesmente por  $\delta_k(n) = e_k(n) \varphi'_k(v_k(n))$ . Como não é conhecido o erro associado à saída do neurônio j (por estar em uma camada oculta), seu gradiente local passa a ser definido como segue:

$$\delta_j(n) = -\frac{\partial \xi(n)}{\partial v_j(n)} = -\frac{\partial \xi(n)}{\partial y_j(n)} \cdot \frac{\partial y_j(n)}{\partial v_j(n)} \quad (43)$$

sendo:

$$\frac{\partial \xi(n)}{\partial y_j(n)} = \sum_k \frac{\partial \xi(n)}{\partial e_k(n)} \cdot \frac{\partial e_k(n)}{\partial y_k(n)} \cdot \frac{\partial y_k(n)}{\partial v_k(n)} \cdot \frac{\partial v_k(n)}{\partial y_j(n)} \quad (44)$$

onde o somatório em k é necessário porque a saída do neurônio j constitui uma entrada para todos os neurônios da camada de saída (assumindo-se uma rede totalmente conectada). Como:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \xi(\mathbf{n})}{\partial e_k(\mathbf{n})} &= e_k(\mathbf{n}) \\
\frac{\partial e_k(\mathbf{n})}{\partial y_k(\mathbf{n})} &= -1 \\
\frac{\partial y_k(\mathbf{n})}{\partial v_k(\mathbf{n})} &= \phi'_k(v_k(\mathbf{n})) \\
\frac{\partial v_k(\mathbf{n})}{\partial y_j(\mathbf{n})} &= w_{kj}(\mathbf{n})
\end{aligned} \tag{45}$$

segue que:

$$\frac{\partial \xi(\mathbf{n})}{\partial y_j(\mathbf{n})} = \sum_k e_k(\mathbf{n}) \cdot (-1) \cdot \phi'_k(v_k(\mathbf{n})) \cdot w_{kj}(\mathbf{n}) \tag{46}$$

ou, ainda:

$$\frac{\partial \xi(\mathbf{n})}{\partial y_j(\mathbf{n})} = - \sum_k \delta_k(\mathbf{n}) w_{kj}(\mathbf{n}) \tag{47}$$

Levando-se este resultado a equação 43, segue finalmente que:

$$\delta_j(\mathbf{n}) = \left( \sum_k \delta_k(\mathbf{n}) w_{kj}(\mathbf{n}) \right) \cdot \phi'_j(v_j(\mathbf{n})) \tag{48}$$

A equação 48 diz simplesmente que o gradiente local de um neurônio  $j$  pertencente a uma camada oculta depende diretamente dos gradientes locais de todos os neurônios pertencentes à camada seguinte (neste caso, a camada de saída), ponderados pelos respectivos pesos sinápticos associados (calculados para o  $n$ -ésimo padrão de entrada), e também da derivada de sua função de ativação, calculada em seu campo local induzido.

Em resumo, o ajuste de pesos pode ser feito pela equação 41, na qual  $\eta$  é a taxa de aprendizagem,  $y_i(\mathbf{n})$  é o sinal de entrada do neurônio  $j$  e  $\delta_j(\mathbf{n})$  é o gradiente local, sendo simplesmente igual a  $e_j(\mathbf{n}) \cdot \phi'_j(v_j(\mathbf{n}))$  se o neurônio  $j$  for um neurônio de saída da rede, e igual  $\left( \sum_k \delta_k(\mathbf{n}) w_{kj}(\mathbf{n}) \right) \cdot \phi'_j(v_j(\mathbf{n}))$  se o neurônio  $j$  for um neurônio oculto da rede. Neste último caso o gradiente local é dependente dos gradientes locais dos neurônios da camada seguinte, e daí o nome *backpropagation* atribuído ao algoritmo.

#### 4.3.1.3. Resilient Backpropagation

Redes do tipo *perceptrons* de múltiplas camadas normalmente empregam funções de ativação sigmoide (figuras 17 e 18) em seus neurônios ocultos. Tais funções são caracterizadas por um comportamento não-linear, com saturação, ou seja, tendem a um valor finito (geralmente -1, 0 ou 1) quando o módulo da variável de entrada – campo local induzido – torna-se excessivamente elevado. Este fato constitui um elemento complicador para o treinamento das redes tipo *perceptrons* de múltiplas camadas via *backpropagation*, visto que o ajuste dos pesos e *bias* destas redes dependem do valor da derivada da função de ativação calculada no campo local induzido dos neurônios ocultos (equações 41 e 48). Para contornar este problema o algoritmo de treinamento utilizado neste trabalho foi o *resilient backpropagation*. Este algoritmo não utiliza diretamente o valor da derivada da função de ativação para efetuar os ajustes dos pesos, mas somente o seu sinal. A intensidade da variação dos pesos sinápticos é definida por um outro parâmetro. No MATLAB<sup>®</sup>, versão 7.4.0.287 (R2007a), tal parâmetro é denominado *delt\_inc* ou *delt\_dec*, conforme o ajuste represente um incremento ou decremento nos pesos, em uma dada iteração. O algoritmo básico é bastante simples e pode ser resumido como segue: um incremento no valor do peso é efetuado quando o sinal da derivada parcial, para aquele peso, mantém-se inalterado por duas iterações consecutivas, e um decremento é efetuado quando este sinal varia de uma iteração para outra. Se a derivada é zero, o valor da atualização permanece o mesmo. Se um peso continua variando em uma mesma direção ao longo de várias iterações o valor de *delt\_inc* ou *delt\_dec* pode ser incrementado ou reduzido, conforme o caso.

O desempenho deste algoritmo não é significativamente afetado pelas escolhas de *delt\_inc* e *delt\_dec* (No MATLAB<sup>®</sup>, os valores iniciais destes parâmetros são: *delt\_inc* = 1,2 e *delt\_dec* = 0,5). Na maioria das aplicações este algoritmo apresenta desempenho bastante superior ao do *backpropagation* tradicional, requerendo apenas um pequeno incremento na necessidade de memória. Assim, para o treinamento das redes neurais utilizadas neste trabalho os seguintes parâmetros foram ajustados como segue:

- Rede\_Neural\_X=newff(M,Camadas,Funcoes\_Camadas,'trainrp');
- Rede\_Neural\_X.trainParam.show = 3;
- Rede\_Neural\_X.trainParam.epochs = 5000;
- Rede\_Neural\_X.trainParam.min\_grad = 1e-18;
- Rede\_Neural\_X.trainParam.goal = 1e-3;
- Rede\_Neural\_X = train(Rede\_Neural\_X,p,t);

sendo:

- Rede\_Neural\_X: rede neural gerada e treinada pelo MATLAB<sup>®</sup>, com X variando de 1 a 4, conforme será detalhado adiante;
- p: matriz que contém todos os vetores do banco de dados de treinamento da rede Rede\_Neural\_X;
- t: matriz que contém todos os vetores que especificam as saídas desejadas para o treinamento da rede Rede\_Neural\_X;
- M: matriz que contém os valores mínimo e máximo de cada linha da matriz p;
- Camadas: variável que contém o número desejado de camadas e o número de neurônios por camada da rede Rede\_Neural\_X;
- Funcoes\_Camadas: variável que contém as funções de ativação desejadas para cada camada (ocultas e de saída) da rede Rede\_Neural\_X.

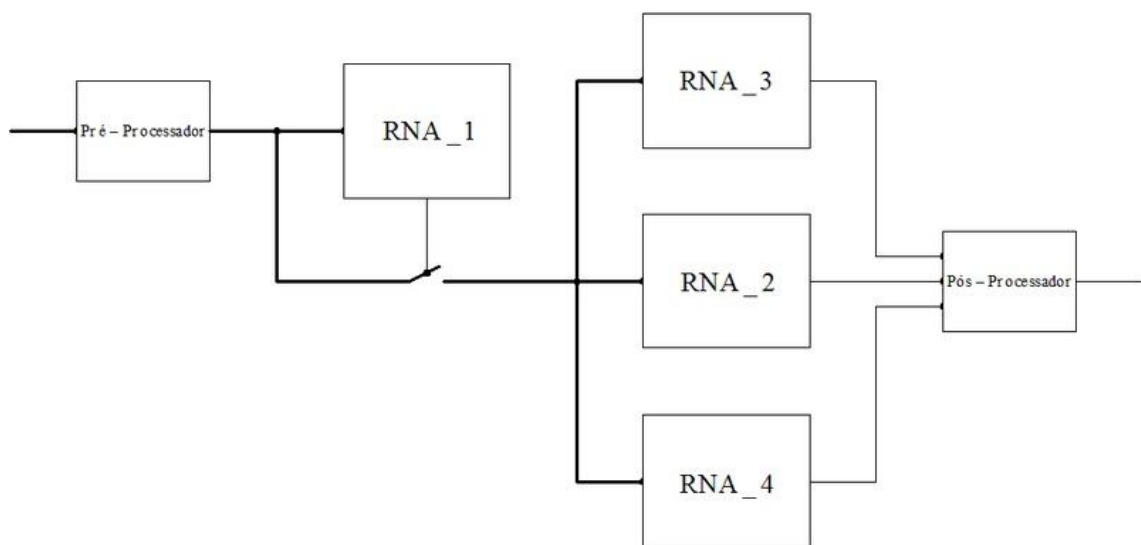
Ou parâmetros, relacionados ao desempenho do algoritmo *resilient backpropagation*, foram mantidos como segue, conforme o padrão do MATLAB<sup>®</sup>:

- Rede\_Neural\_X.trainParam.time = inf;
- Rede\_Neural\_X.trainParam.max\_fail = 5;
- Rede\_Neural\_X.trainParam.lr = 0.01;
- Rede\_Neural\_X.trainParam.delt\_inc = 1.2;
- Rede\_Neural\_X.trainParam.delt\_dec = 0.5;
- Rede\_Neural\_X.trainParam.delta0 = 0.07;
- Rede\_Neural\_X.trainParam.deltamax = 50.0;

Todas as informações necessárias para a implementação e treinamento das redes neurais utilizadas neste trabalho, através do *software* MATLAB<sup>®</sup>, versão 7.4.0.287 (R2007a), foram extraídas do documento *Neural network toolbox* (DEMUTH; BEALE, 1998), versão 3.0.

## 5. METODOLOGIA PROPOSTA DE DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE CURTOS-CIRCUITOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A estrutura básica do sistema de detecção e classificação de faltas proposto neste trabalho é apresentada na figura 24. Seu objetivo é identificar e classificar as faltas ocorridas ao longo do alimentador de distribuição com rapidez, elevada confiabilidade e baixo custo computacional. Sua implementação pode ser efetuada sem a necessidade de grandes investimentos iniciais. Toda informação relativa ao estado do alimentador é obtida através do monitoramento das correntes nele injetadas, medidas unicamente na saída da subestação de distribuição. Supõe-se disponível a função de oscilografia destas correntes, que serão processadas e analisadas via Transformada de Fourier, gerando informações para levantamento de padrões via redes neurais. A proposta inclui a determinação dos parâmetros de entrada das redes neurais, a configuração do sistema e a tomada de decisão, mostrando-se adequada para operação em grandes sistemas.



**Figura 24: Diagrama de blocos funcional do sistema de diagnóstico de faltas proposto.**

A atuação do sistema de detecção e classificação de faltas consiste na execução de três etapas bem definidas de processamento da informação contida nas formas de onda das correntes, monitoradas na saída do alimentador da subestação. Duas destas etapas, que em conjunto atuam como um extrator de características, são efetuadas em um único bloco de processamento, podendo ser encaradas como um operador linear, ou mapeamento de um espaço de entrada vetorial real em um espaço de saída vetorial complexo. A primeira etapa

consiste no cálculo dos fasores que representam *alguns* componentes harmônicos das correntes injetadas no alimentador. A definição de quais harmônicos devem ser utilizados constitui um problema complexo, cuja solução analítica é evitada. Neste trabalho, o caminho adotado para a solução deste problema é a experimentação, conforme será visto adiante. A segunda etapa consiste no cálculo de um ou mais componentes sequenciais das sequências de fasores obtidas na etapa anterior. Finalmente, na última etapa, é utilizado um banco de redes neurais artificiais com o propósito de identificar e classificar os vários tipos de faltas. Um bloco de pós-processamento realiza a interface entre os sinais de saída das redes e o operador. O sinal de entrada destas redes é constituído por um vetor cujos elementos são os fasores sequenciais obtidos nas etapas anteriores.

Nesta proposta, a detecção e a classificação das faltas têm como base a análise, via redes neurais artificiais, do conteúdo harmônico das correntes injetadas no alimentador, associado ao período transitório das faltas. Nenhuma informação do período pós-falta é necessária, ainda que possa opcionalmente ser incluída. Com isso, a detecção e a classificação das faltas ocorrem em poucos ciclos do componente fundamental, considerado fixo em 60 Hz, com possibilidade de pequenas variações, mas sem necessidade de uso de um sistema mais preciso e robusto para detectar a fundamental, como o método proposto por (PÁDUA et al., 2007).

Antes de descrever a função e o funcionamento de cada bloco, é importante destacar outra característica essencial desta proposta: todos os parâmetros importantes do sistema de detecção e classificação de faltas são definidos através de simulações, por um processo experimental e iterativo, o qual visa estabelecer o melhor compromisso entre desempenho e disponibilidade de recursos computacionais para a implementação do sistema. Assim, a princípio, apenas a arquitetura geral do sistema é fixa. Variáveis como os componentes harmônicos das correntes, os componentes sequenciais dos fasores representativos destes harmônicos, a topologia das redes, incluindo o número de camadas, o número de neurônios por camada e as funções de ativação empregadas, não são definidas a priori, mas são o resultado de um grande número de testes que levam em conta, entre outros fatores, a topologia do alimentador, representada por um modelo passível de simulação. Para possibilitar a realização de vários testes envolvendo ajustes diferentes destes parâmetros, mas mantendo sempre a estrutura geral apresentada na figura 24, foi elaborado um ambiente de desenvolvimento e simulação de sistemas de detecção e classificação de faltas, utilizando para isto o *software* MATLAB<sup>®</sup>.

Um modelo de sistema de distribuição real de grande porte, com 836 barras e tensão nominal de operação de 11,4 kV foi utilizado para as simulações das faltas. A fim de formar um banco de dados de simulação de faltas, utilizado no treinamento das RNAs, foram escolhidas 44 barras, nas quais foram efetuadas simulações dos seguintes tipos de faltas: faltas monofásicas (fase-terra), bifásicas (fase-fase) e trifásicas. Não foram incluídas faltas do tipo bifásica à terra. Portanto, no total foram efetuadas 308 simulações. O tempo total de simulação adotado, para cada simulação, corresponde a 10 ciclos, ou aproximadamente 166,7 ms. O ponto de incidência das faltas foi tomado ao final do quinto ciclo da tensão da fase A, ou seja, em aproximadamente 83,3 ms, correspondendo a um ângulo de incidência de 90 graus (em relação à tensão da fase A). Para faltas monofásicas a resistência de falta adotada foi de 40  $\Omega$ . Para faltas bifásicas, a resistência de falta entre fases adotada foi de 1  $\Omega$ . O estado do alimentador antes da aplicação das faltas é apresentado na tabela 1, para  $V_{\text{Base}} = 11,4 \text{ kV}$  e  $S_{\text{Base}} = 5 \text{ MVA}$ . Os dados foram obtidos através da aplicação da DFT aos cinco primeiros ciclos de tensão e corrente, correspondentes ao período pré-falta, comum a todas as simulações de faltas.

Tabela 1: Estado do sistema de distribuição antes da aplicação das faltas.

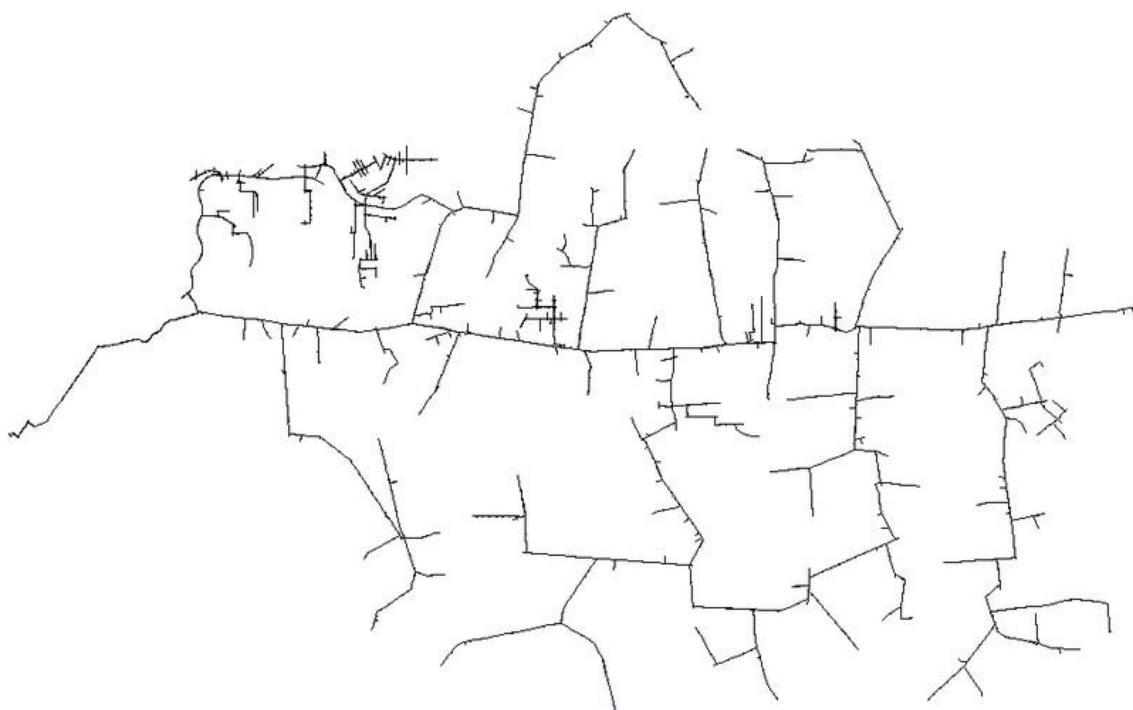
<b>Grandeza</b>	<b>Valor Eficaz [pu]</b>	<b>Ângulo [graus]</b>
Tensão Fase A	0,9876	-2,60
Tensão Fase B	0,9918	-122,10
Tensão Fase C	0,9967	117,99
Corrente Fase A	1,5421	-31,63
Corrente Fase B	0,9619	-150,63
Corrente Fase C	0,5923	97,10

Os dados da tabela 1 indicam que o estado do alimentador, no período pré-falta, é caracterizado por um elevado desequilíbrio das correntes. É fácil verificar que os componentes de sequência positiva e negativa das tensões e correntes pré-falta são dados por:  $\dot{I}_+ = 1,03 \angle -29,6^\circ$ ,  $\dot{I}_- = 0,29 \angle -13,5^\circ$ ,  $\dot{V}_+ = 0,99 \angle -2,2^\circ$  e  $\dot{V}_- = 0,005 \angle -113,7^\circ$ , todos expressos em pu. Os graus de desequilíbrio de corrente e tensão podem ser obtidos como segue (OLIVEIRA et al., 2000):

$$\frac{|\dot{I}_-|}{|\dot{I}_+|} \approx 0,283 \quad \text{e} \quad \frac{|\dot{V}_-|}{|\dot{V}_+|} \approx 0,005 \quad (49)$$

Desequilíbrios dessa magnitude (cerca de 30% para as correntes) constituem um dos fatores complicadores no desenvolvimento de sistemas de detecção e classificação de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica, visto que não é possível associar este desequilíbrio a um estado de anormalidade, a menos que ultrapasse um valor preestabelecido para a operação segura do alimentador. O baixo desequilíbrio de tensão reflete a regulação de tensão normalmente encontrada nas subestações de distribuição.

Um segundo banco de dados de simulações de faltas foi obtido, com simulações em 42 barras não utilizadas na etapa de treinamento, para formar um banco de dados capaz de avaliar o desempenho final do sistema de diagnóstico de faltas implementado. As barras utilizadas para o treinamento das redes foram as de número 05, 10, 15 e todas as múltiplas inteiras de 20, entre 20 e 820, inclusive. Para a validação do treinamento foram utilizadas as barras 03, 28, 53, 71, 85, 111, 126, 155, 162, 191, 205, 233, 254, 264, 290, 312, 327, 348, 374, 385, 410, 430, 452, 467, 487, 515, 533, 542, 566, 593, 611, 627, 655, 673, 684, 710, 725, 748, 773, 792, 813 e 836, escolhidas aleatoriamente, com exceção das barras 03 e 836, por sua importância na avaliação do desempenho dos sistemas implementados, sendo a barra 03 a mais próxima da subestação e a barra 836 é a mais distante. Na figura 25 apresenta-se a topologia do alimentador utilizado como modelo neste trabalho.



**Figura 25:** Topologia do alimentador utilizado como modelo. Apenas os caminhos traçados pela rede primária estão indicados. Este alimentador é caracterizado por um elevado número de ramais e sub-ramais.

## 5.1. DESCRIÇÃO DOS BLOCOS FUNCIONAIS

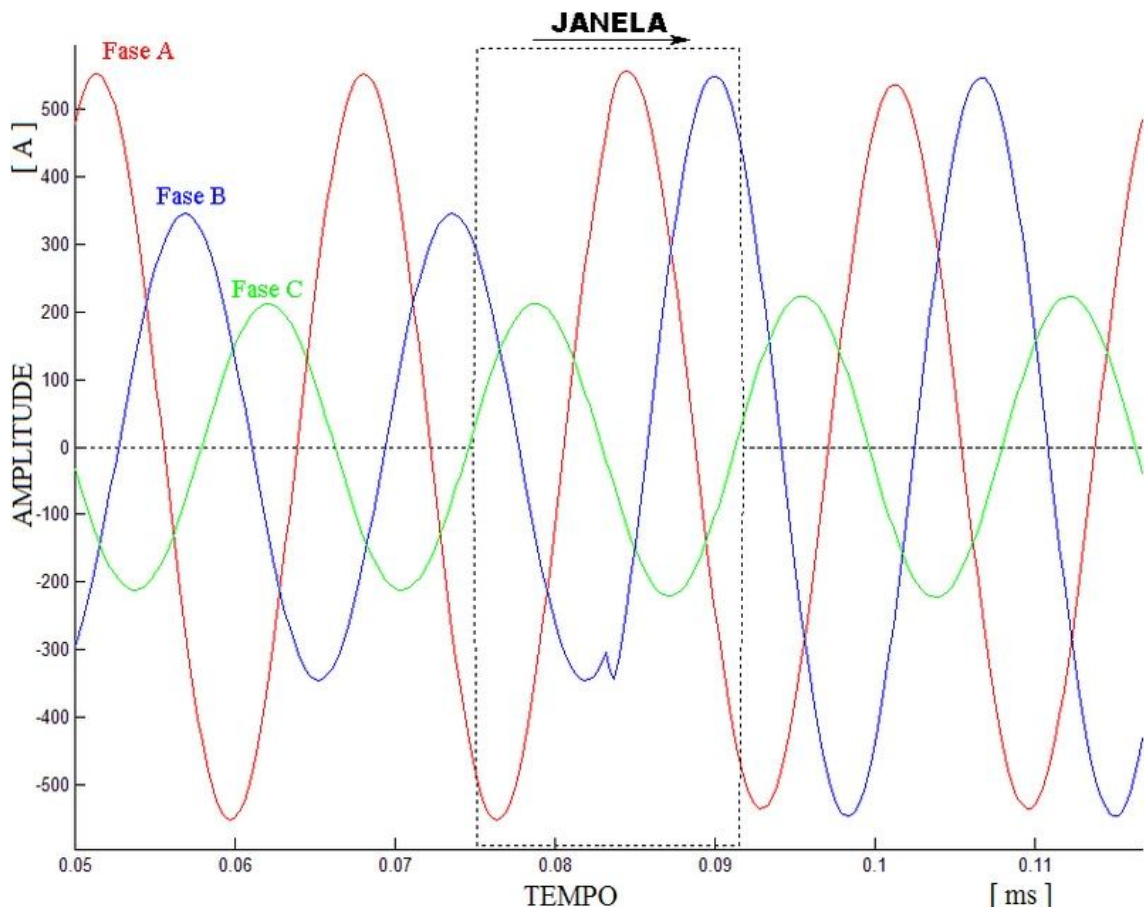
Como se vê na figura 24, o sistema de diagnóstico de faltas é constituído por seis blocos funcionais: um pré-processador, um pós-processador e quatro redes neurais artificiais, das quais três devem operar em paralelo. As redes operam como classificadores de padrões, associando os sinais de entrada a determinadas classes ou tipos de faltas. Neste trabalho foram empregadas redes acíclicas do tipo *perceptrons* de múltiplas camadas, totalmente conectadas, treinadas com o algoritmo de retropropagação de erro. Várias topologias de redes foram implementadas e testadas.

### 5.1.1. BLOCO DE PRÉ-PROCESSAMENTO

O bloco de pré-processamento atua como um extrator de características, executando basicamente uma filtragem do sinal de entrada. Seu objetivo é selecionar criteriosamente o conteúdo essencial da informação que deverá ser apresentada às redes, extraída dos sinais de entrada, de forma a preservar as características que permitam a classificação com elevada confiabilidade. O pré-processamento dos sinais de entrada deve ser realizado com baixo custo computacional e de forma a concentrar muita informação sobre as características dos sinais processados em uma reduzida quantidade de coeficientes, a fim de simplificar a topologia das redes neurais utilizadas na classificação, bem como reduzir o tempo necessário para o treinamento e posterior operação das mesmas. A operação do bloco de pré-processamento é descrita a seguir.

O vetor de entrada do bloco de pré-processamento é constituído por uma sequência de amostras das correntes das fases A, B e C, injetadas no alimentador na saída da subestação. Estas correntes são normalmente monitoradas por algum dispositivo empregado na proteção e/ou medição. No que segue, será admitido que estas correntes são amostradas a uma taxa fixa de 3840 Hz. As correntes efetivamente amostradas correspondem àquelas circulantes nos secundários dos TCs empregados na proteção e/ou medição, previamente filtradas para impedir a ocorrência de “*aliasing*” no processo de amostragem, o que é obtido atenuando-se fortemente as frequências acima de 1920 Hz. Para a taxa de amostragem adotada, no caso em que a frequência da rede permanece fixa em 60 Hz, serão obtidas 64 amostras para cada ciclo do componente fundamental. Se for definido um tempo de amostragem  $T_d$ , ou duração da amostragem, equivalente a  $N \times T$ , sendo  $N$  o número total de amostras por fase na janela utilizada no cálculo da DFT e  $T$  o período da amostragem, então  $T_d$  deverá corresponder a  $p$

ciclos completos do componente fundamental, com  $p$  inteiro. Nestas condições, e observado o teorema de Nyquist, não ocorrerão erros no cálculo dos fasores representativos das correntes nos períodos pré e pós-falta [(OPPENHEIM, 1999) e (ORSINI, 1994)]. Estas condições foram observadas no que segue e, portanto, foram obtidas, em cada fase, um número de amostras  $N = p \times 64$ , totalizando  $3 \times N$  amostras para as três fases. Estas amostras constituem os elementos do vetor de entrada do bloco de pré-processamento. Na figura 3 ilustra-se o processo de obtenção do vetor de entrada, para  $p = 1$  e, portanto,  $N = 64$  amostras por fase.



**Figura 26:** As amostras das correntes nas três fases, tomadas no intervalo de tempo  $T_d$  indicado pelas linhas pontilhadas, constituem, para um dado instante, a entrada do sistema de detecção e classificação de faltas.

Como o processo de amostragem é mantido ao longo do tempo, constantemente as amostras que compõem o vetor de entrada devem ser atualizadas de forma a sempre refletir o estado atual do alimentador. Caso a atualização ocorra a cada nova amostra obtida, o sistema de diagnóstico de faltas deverá ser capaz de gerar uma saída para o vetor de entrada anterior em um tempo inferior a  $1/3840$  segundo, o que poderá tornar inviável a implementação por *software*, dependendo dos recursos computacionais disponíveis. Assim, o número de amostras

que devem ser tomadas antes da atualização do vetor de entrada, aqui denominado passo da janela, deve ser condizente com o tempo de resposta requerido pelo sistema de diagnóstico de faltas. Pode-se visualizar a atualização do vetor de entrada como o deslocamento para a esquerda das formas de onda das correntes, “atravessando a janela”, ou ainda como o deslocamento da janela “através das formas de onda”, da esquerda para a direita, como indicado na figura 26.

A duração da amostragem  $T_d$  deve corresponder a um número inteiro de ciclos do componente harmônico fundamental para evitar certos tipos de erros na determinação do espectro do sinal amostrado, denominados efeito cerca (*picket fence effect*) e vazamento espectral (*leakage effect*). De fato, se nenhuma providência adicional for tomada, estes erros acabarão por surgir em função da variação da frequência do próprio sistema de distribuição, que em condições normais de operação pode ocorrer na faixa de 59,9 a 60,1 Hz e em condições críticas entre 56,5 e 66 Hz (PRODIST – Módulo 8). Neste trabalho não foram implementadas medidas corretivas de tais efeitos por razões que serão apresentadas oportunamente. Assim, o vetor de entrada do bloco de pré-processamento é dado genericamente por:

$$E = [i_A[1] \quad \dots \quad i_A[N] \quad i_B[1] \quad \dots \quad i_B[N] \quad i_C[1] \quad \dots \quad i_C[N]]^T \quad (50)$$

Na equação 50,  $E$  é o vetor de entrada do bloco de pré-processamento e  $i_F[n]$  é a  $n$ -ésima amostra da corrente da fase  $F$  ( $F = A, B$  ou  $C$ ). Para simplificar a notação não foi utilizado um índice de tempo para caracterizar o instante em que cada amostra é tomada. Com base nestas amostras, os fasores representativos de cada componente harmônico podem ser determinados através das equações 51 e 52, apresentadas a seguir.

$$\dot{I}_{k\_ham}^F = \left( \frac{\sqrt{2}}{N} \right) \cdot I_F[1 + k \cdot p] \quad \begin{cases} k = 0, 1, \dots, (N/2) - 1 & \text{para } N \text{ par} \\ k = 0, 1, \dots, (N-1)/2 & \text{para } N \text{ ímpar} \end{cases} \quad (51)$$

$$I_F[k] = \sum_{n=1}^N i_F[n] \cdot e^{-j(k-1) \cdot \frac{2\pi}{N} \cdot (n-1)} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (52)$$

Na equação 51  $\dot{I}_{k\_ham}^F$  é o fasor representativo do  $k$ -ésimo componente harmônico da corrente na fase  $F$  ( $F = A, B$  ou  $C$ ). O termo  $\sqrt{2}/N$  foi utilizado a fim de que o módulo do fasor corresponda ao valor eficaz do respectivo componente harmônico (ver equação 31 e anteriores). Entretanto, para a aplicação em questão, poderia ser omitido. Na equação 52,  $I_F[k]$  é a DFT de  $i_F[n]$ . Esta equação difere ligeiramente da definição usual de DFT (equação

25) apenas para levar em consideração a notação geralmente adotada em programação, onde os índices  $n$  e  $k$  (de tempo e frequência discreta) variam entre 1 e  $N$  (e não entre 0 e  $N-1$ ). Neste trabalho, o cálculo da DFT foi efetuado pelo *software* MATLAB<sup>®</sup>, através da função *fft* (*Fast Fourier Transform*). Para a etapa de treinamento das redes neurais e para a operação do sistema de classificação de faltas apenas alguns harmônicos são de fato necessárias. Assim, poderia ser utilizada diretamente a equação 52 para o cálculo de tais harmônicos, ou mesmo um algoritmo otimizado como o algoritmo de *Goertzel* de segunda ordem (OPPENHEIM, 1999), visto que estes procedimentos evitariam o cálculo de todos os coeficientes da DFT, como ocorre com a aplicação da *fft*. Contudo, conforme pode ser visto na tabela 2, a aplicação da *fft* é vantajosa mesmo para o cálculo do componente fundamental somente, sendo por esta razão empregada. Na obtenção dos dados da tabela 2 foram utilizados os cinco primeiros períodos anteriores à aplicação da falta. *Oppenheim* sugere que o cálculo da DFT pelo algoritmo de *Goertzel* de segunda ordem é vantajoso para a obtenção de um número de coeficientes inferior a  $\log_2(p \times N)$ , o que não se confirma pelos dados da tabela 2, visto que o tempo demandado pelo algoritmo de *Goertzel* para o cálculo de apenas um ponto, correspondente ao componente fundamental, foi muito superior ao tempo necessário para que a *fft* calculasse todos os coeficientes da DFT.

Tabela 2: Tempo necessário para o cálculo do componente fundamental da corrente para três diferentes algoritmos.

Número de ciclos	Equação 52 [ms]	Goertzel [ms]	<i>fft</i> [ms]
1	0.3137	0.3807	0.0135
2	0.5679	0.3370	0.0150
3	0.8003	0.3359	0.0171
4	1.0399	0.3436	0.0243
5	1.2760	0.3379	0.0301

Obs: O computador utilizado possui processador Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU E4500 @2.20GHz (2CPUs), 1920 MB de memória RAM e sistema operacional Microsoft Windows XP Professional (5.1, Compilação 2600). Foi utilizada a versão 7.4.0.287 (R2007a) do MATLAB<sup>®</sup>.

Uma vez que se tenha definido quais componentes harmônicos serão empregados, bem como o valor de  $p$ , os fasores que representam esses harmônicos podem ser calculados pelas equações 51 e 52. Os resultados obtidos podem ser organizados em uma matriz de fasores  $F$ , que, para  $N$  par, é dada genericamente pela equação 53.

$$F = \begin{bmatrix} \dot{I}_{1^{\circ}h}^A & \dot{I}_{2^{\circ}h}^A & \cdots & \dot{I}_{(N/2-1)^{\circ}h}^A \\ \dot{I}_{1^{\circ}h}^B & \dot{I}_{2^{\circ}h}^B & \cdots & \dot{I}_{(N/2-1)^{\circ}h}^B \\ \dot{I}_{1^{\circ}h}^C & \dot{I}_{2^{\circ}h}^C & \cdots & \dot{I}_{(N/2-1)^{\circ}h}^C \end{bmatrix} \quad (53)$$

sendo  $\dot{I}_{k^{\circ}h}^F$  o fasor representativo do k-ésimo componente harmônico da corrente, calculado para cada fase. A matriz F, apresentada genericamente na equação 53, deverá conter idealmente o menor número possível de fasores. Uma vez formada a matriz F, pode-se determinar em seguida sua representação em componentes simétricos, denominada matriz S, obtida conforme a equação 54.

$$S = T^{-1} \cdot F = \begin{bmatrix} \dot{I}_0^{1^{\circ}h} & \dot{I}_0^{2^{\circ}h} & \cdots & \dot{I}_0^{(N/2-1)^{\circ}h} \\ \dot{I}_+^{1^{\circ}h} & \dot{I}_+^{2^{\circ}h} & \cdots & \dot{I}_+^{(N/2-1)^{\circ}h} \\ \dot{I}_-^{1^{\circ}h} & \dot{I}_-^{2^{\circ}h} & \cdots & \dot{I}_-^{(N/2-1)^{\circ}h} \end{bmatrix} \quad (54)$$

sendo  $T^{-1}$  dada por:

$$T^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \quad (55)$$

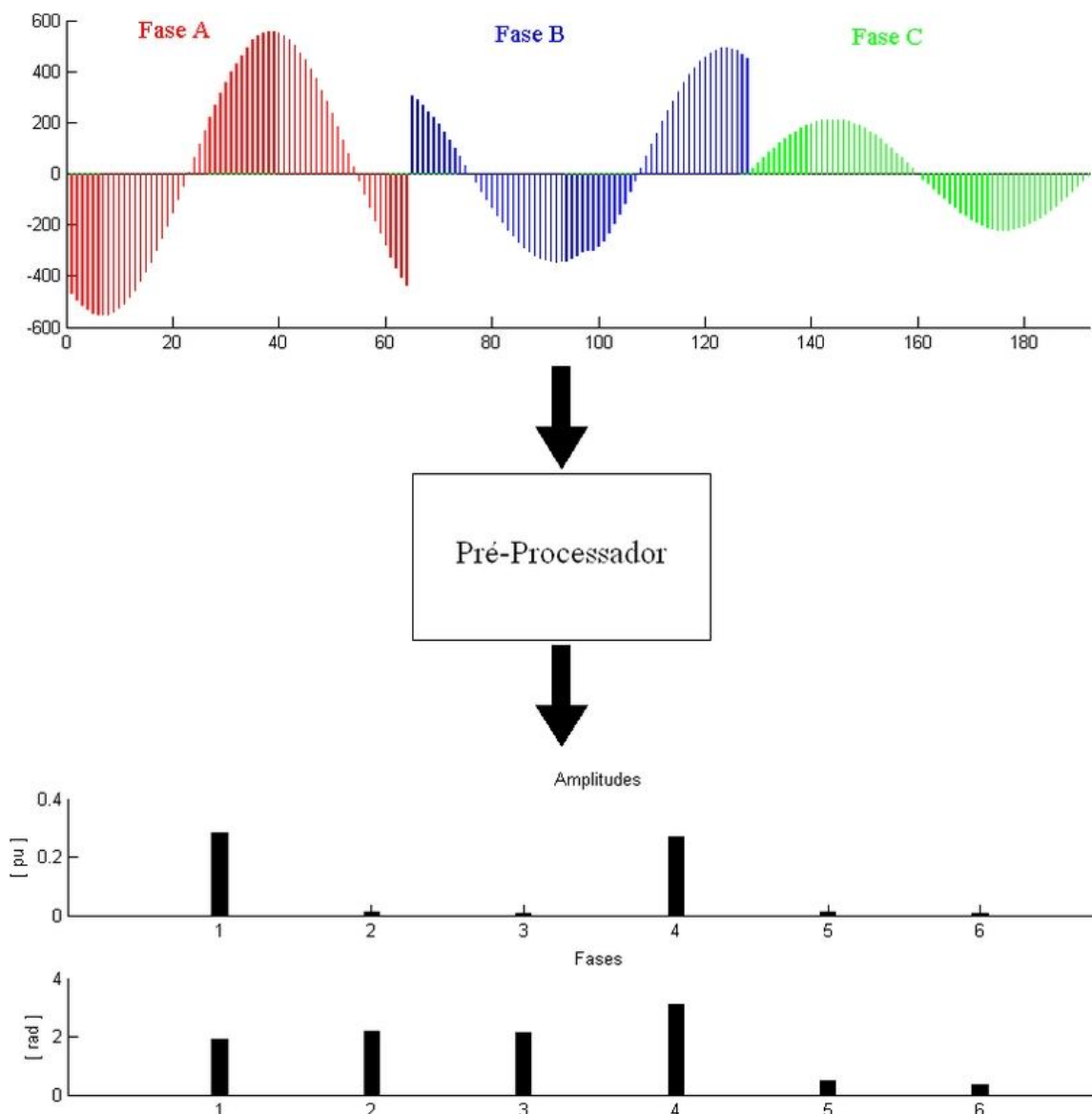
Na equação 55  $\alpha = e^{j(2\pi/3)}$ , sendo  $T^{-1}$  a inversa da matriz de transformação de componentes simétricos. Na equação 54,  $\dot{I}_0^{k^{\circ}h}$ ,  $\dot{I}_+^{k^{\circ}h}$  e  $\dot{I}_-^{k^{\circ}h}$  são os componentes de sequência zero, positiva e negativa da sequência formada pelos fasores representativo do k-ésimo componente harmônico.

A matriz S contém toda a informação necessária para recuperar as formas de onda das correntes originais, a menos do valor dc destas correntes, assumindo que a frequência do sistema se mantenha fixa em 60 Hz mesmo durante o período transitório das faltas. A transformação fasorial e a representação em componentes simétricos podem então ser vistos como operações lineares inversíveis, aplicadas sobre as sequências de amostras das correntes de fase. O que se pretende, contudo, é apenas detectar e diferenciar os diversos tipos de faltas a partir da informação contida na matriz S. Como exemplo, digamos que sejam selecionados o 1º, 3º e 5º harmônicos das correntes, e ainda que, de alguma maneira, *fique estabelecido* que a informação contida nos componentes de sequência zero e negativa destes harmônicos seja suficiente para caracterizar completamente os diversos tipos de falta, de tal forma que o vetor de características C, dado por:

$$C = \left[ \left| \dot{i}_0^{1^o h} \right| \quad \left| \dot{i}_0^{3^o h} \right| \quad \left| \dot{i}_0^{5^o h} \right| \quad \left| \dot{i}_-^{1^o h} \right| \quad \left| \dot{i}_-^{3^o h} \right| \quad \left| \dot{i}_-^{5^o h} \right| \quad \angle \dot{i}_0^{1^o h} \quad \angle \dot{i}_0^{3^o h} \quad \angle \dot{i}_0^{5^o h} \quad \angle \dot{i}_-^{1^o h} \quad \angle \dot{i}_-^{3^o h} \quad \angle \dot{i}_-^{5^o h} \right]^T \quad (56)$$

possa ser utilizado eficazmente para a detecção e classificação dos vários tipos de falta.

Na figura 27 ilustra-se a operação do bloco de pré-processamento para  $p = 1$  e  $N = 64$ . Nesta figura, o vetor de entrada  $E$  possui 192 elementos reais, sendo 64 elementos para cada corrente, enquanto o vetor de características  $C$ , dado pela equação 56, é formado por apenas 6 números complexos, ou 12 elementos reais (módulos e fases), reduzindo substancialmente a quantidade de informação apresentada às redes.



**Figura 27:** Operação do bloco de pré-processamento. Um vetor de características  $C$  é obtido a partir do vetor de entrada  $E$ . Os três primeiros elementos do espectro de amplitude correspondem aos módulos dos componentes de sequência zero das sequências de correntes correspondentes ao 1º, 3º e 5º harmônicos.

O caminho adotado para estabelecer a validade da utilização do vetor C como um extrator de características das correntes injetadas no alimentador, capaz de concentrar informação suficiente para a detecção e classificação dos vários tipos de falta, consiste basicamente, nesta proposta, na experimentação.

### 5.1.2. BANCO DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS

Os blocos responsáveis pela detecção e classificação das faltas são constituídos por redes neurais artificiais acíclicas, tipo *perceptrons* de múltiplas camadas. A primeira rede neural, rede RNA\_1, é responsável pela detecção da falta, qualquer que seja seu tipo. Possui apenas uma saída, a qual deverá indicar o nível lógico 1 na ocorrência de uma falta e zero nas demais situações, incluindo a operação normal e os transitórios associados a chaveamentos de cargas, manobras e energizações de equipamentos. Neste trabalho, esta rede foi treinada apenas com padrões de falta e de normalidade. Em última análise, sua saída determina se o padrão associado à determinada entrada encerra uma elevada probabilidade de pertencer a uma categoria de falta, devendo ou não ser apresentado as demais redes a fim de se identificar o tipo de falta e as fases envolvidas. A não identificação de um padrão de falta, para a entrada atual, impede que esta entrada se propague para as demais redes. A finalidade deste procedimento é impedir a atuação indevida do sistema, apesar de tornar a confiabilidade da rede RNA\_1 essencial para a operação do sistema como um todo. A segunda rede neural, rede RNA\_2, é responsável pela classificação das faltas em dois grupos distintos: monofásicas e demais faltas (bifásicas e trifásicas). Neste trabalho, não foram simuladas faltas do tipo bifásica a terra. A rede RNA\_2 somente deverá ter acesso aos padrões considerados faltosos pela RNA\_1 e, portanto, todas as suas saídas indicam padrões de falta. A tabela 3 fornece as saídas associadas às respectivas faltas, conforme classificadas pela RNA\_2.

Tabela 3: Saídas geradas pela rede RNA\_2, associadas às respectivas faltas.

<b>Tipo de Falta</b>	<b>Saída Correspondente</b>	<b>Classificação da Falta</b>
Monofásica Fase A	100	Falta Monofásica
Monofásica Fase B	010	
Monofásica Fase C	001	
Bifásica, Fases A e B	110	Falta Bifásica ou Trifásica
Bifásica, Fases B e C	011	
Bifásica, Fases C e A	101	
Trifásicas	111	

Como se pode observar na tabela 3, a rede RNA\_2 é treinada para identificar tanto o tipo de falta quanto as fases envolvidas. Contudo, a fim de melhorar a confiabilidade da classificação são empregadas outras duas redes, RNA\_3 e RNA\_4, as quais devem atuar em paralelo com a RNA\_2, de forma que qualquer padrão de falta detectado pela RNA\_1 deve ser apresentado simultaneamente a essas redes. A RNA\_3 é treinada exclusivamente para identificar a fase envolvida nas faltas monofásicas. A RNA\_4 é treinada exclusivamente para identificar as fases envolvidas nas demais faltas (bifásicas e trifásicas). Este procedimento visa introduzir um certo grau de redundância ao processo de detecção sem, contudo, elevar o tempo necessário para a classificação da falta, visto que todas estas redes, com exceção da RNA\_1, operam em paralelo (obviamente, supondo-se neste caso a implementação em *hardware* de todas as redes). A tabela 4 fornece as saídas associadas a cada tipo de falta para as redes RNA\_3 e RNA\_4.

Tabela 4: Saídas geradas pelas redes RNA\_3 e RNA\_4, associadas às respectivas fases.

<b>Rede Neural Artificial</b>	<b>Saída</b>	<b>Tipo de Falta</b>
RNA_3	100	Monofásica Fase A
	010	Monofásica Fase B
	001	Monofásica Fase C
RNA_4	110	Bifásica, Fases A e B
	011	Bifásica, Fases B e C
	101	Bifásica, Fases C e A
	111	Trifásicas

Com base nas informações anteriores e nos dados das tabelas 3 e 4, a operação do sistema de detecção e classificação de faltas proposto pode ser descrito pelas seguintes etapas:

- Detecção da falta pela rede RNA\_1. Uma vez detectado um padrão de falta, este é imediatamente apresentado às demais redes;
- Classificação da falta pela rede RNA\_2 e, simultaneamente, pelas redes RNA\_3 e RNA\_4. Embora a RNA\_2 forneça as fases em falta, esta informação só poderá ser considerada correta se confirmada pelas demais redes;
- Análise das saídas das redes RNA\_2, RNA\_3 e RNA\_4, para um número preestabelecido de entradas faltosas, sequencialmente detectadas em um dado intervalo de tempo.

A 3ª etapa corresponde à análise dos resultados gerados pelo sistema de detecção e classificação de faltas, corresponde à atuação do bloco de pós-processamento. Este bloco será melhor analisado após a descrição da metodologia de implementação do sistema de detecção e classificação de faltas, apresentada no item seguinte.

## **5.2. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS PROPOSTO**

O método empregado nesta proposta para o ajuste de todos os parâmetros de interesse que afetam o desempenho do sistema de detecção e classificação de faltas foi a experimentação, através de simulações computacionais no MATLAB<sup>®</sup>. Assim, foram obtidos dois bancos de dados distintos de simulações de faltas em um modelo de alimentador real de sistema de distribuição de energia elétrica, através do *software* ATP-EMTP, sendo um utilizado para o treinamento das redes e outro utilizado para a aferição do desempenho do sistema, como descrito anteriormente. Ao invés de se implementar *um* sistema de diagnóstico de faltas apenas, foi desenvolvido um *ambiente de simulação*, através do *software* MATLAB<sup>®</sup>, por meio do qual foi possível implementar e testar vários sistemas, todos obedecendo à arquitetura geral apresentada nos itens anteriores, contudo diferindo bastante na definição de seus parâmetros internos, de forma a permitir uma análise comparativa capaz de orientar a definição das especificações finais do projeto. O ambiente de simulação implementado possui uma interface gráfica simples, através da qual é possível ajustar os diversos parâmetros do sistema de detecção e classificação de faltas. O processo de escolha dos parâmetros de interesse do sistema de diagnóstico de faltas proposto será ilustrado a seguir através de um exemplo prático. Para evitar a apresentação de todas as telas que fazem a interface com o operador, apenas as principais são apresentadas. Os primeiros parâmetros a serem definidos são o tamanho da janela (ou a duração da amostragem  $T_d$ ), em número de períodos do componente fundamental, e o número de amostras que deverão ser tomadas antes da atualização da janela, conforme exemplo ilustrado na figura 28.

```

----- SISTEMA DE DETECÇÃO DE FALTAS -----
PRIMEIRA ETAPA - FORMAÇÃO DAS MATRIZES DE TREINAMENTO DAS REDES
-----

DIGITE O NÚMERO DE PERÍODOS ABRANGIDOS PELA JANELA ( < = 5 ) :

NÚMERO DE PERÍODOS DA JANELA      =      2

DIGITE O NÚMERO DE AMOSTRAS DO PASSO DA JANELA:

NÚMERO DE AMOSTRAS DO PASSO      =      12

DESEJA UTILIZAR O ARQUIVO PADRÃO DE FALTAS SIMULADAS?

[ SIM = 1 ]   <<<>>>   [ NÃO = 0 ]   <<<>>>   0

```

**Figura 28: Definição do tamanho da janela, em número de períodos do componente fundamental, e do número de amostras que devem ser tomadas antes da atualização da janela.**

Neste caso, o vetor E será formado por 384 amostras, sendo 128 amostras para cada corrente de fase, uma vez que a janela deverá abranger 2 períodos do componente fundamental (supondo a frequência da rede fixa em 60 Hz). A atualização do vetor E ocorrerá após serem obtidas, em cada fase, 12 novas amostras. A seguir são selecionadas as barras que deverão tomar parte no treinamento das redes neurais, conforme figura 29. Neste caso foram selecionadas as barras 5, 15, 120, 260, 440, 580, 700 e 820. Em cada barra foram previamente efetuadas 7 simulações: faltas monofásicas, bifásicas e trifásica, envolvendo todas as fases, com exceção das faltas bifásicas à terra, as quais não foram utilizadas neste trabalho.

```

SELECIONE AS BARRAS QUE DEVEM SER UTILIZADAS PARA O TREINAMENTO DAS REDES:

    5    10    15    20    40    60    80    100    120    140    160    180    200    220    240
260    280    300    320    340    360    380    400    420    440    460    480    500    520    540
560    580    600    620    640    660    680    700    720    740    760    780    800    820

EXEMPLO: [20 40 60 ...]

VETOR DE BARRAS EM FALTA = [5 15 120 260 440 580 700 820]

```

**Figura 29: Seleção das barras que deverão formar o conjunto de treinamento das redes.**

Os dados referentes às simulações de faltas, armazenados em arquivos *.txt* gerados pelo ATP-EMTP são então carregados na memória do MATLAB<sup>®</sup>. A seguir são definidos quais componentes harmônicos e quais componentes sequenciais serão utilizados para a classificação das faltas, conforme figura 30. Neste exemplo, foram selecionados os componentes de sequência positiva e negativa das sequências formadas pelos 2º, 3º e 5º harmônicos das correntes injetadas no alimentador.

```

ENTRE COM AS COMPONENTES HARMÔNICAS QUE VOCÊ DESEJA UTILIZAR:
EXEMPLO:          [ 1 2 3 4 5]

HARMÔNICAS:      [ 2 3 5]

-----
QUAIS COMPONENTES SEQUENCIAIS PRETENDE UTILIZAR?

SEQUÊNCIA NULA:    >> [ SIM = 1 ]   -//- [ NÃO = 0 ] <<<>>> 0
SEQUÊNCIA POSITIVA: >> [ SIM = 1 ]   -//- [ NÃO = 0 ] <<<>>> 1
SEQUÊNCIA NEGATIVA: >> [ SIM = 1 ]   -//- [ NÃO = 0 ] <<<>>> 1

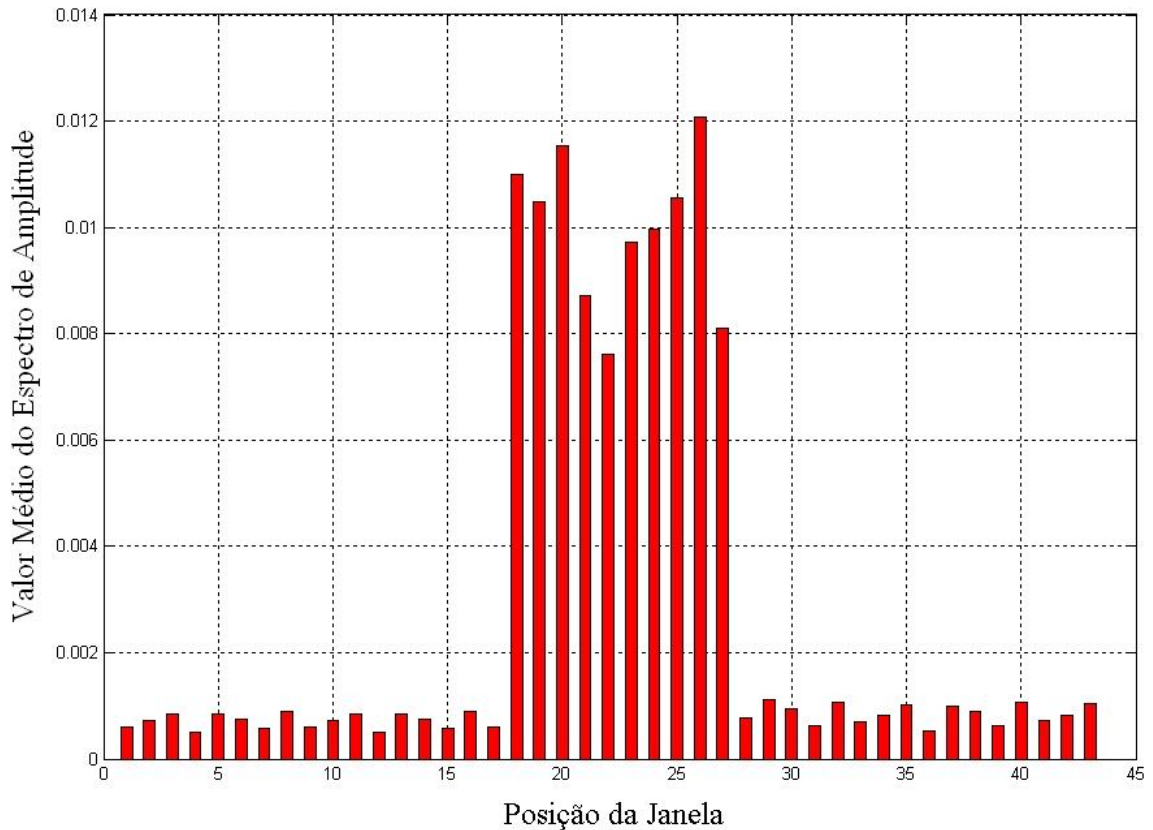
```

**Figura 30: Formação do vetor de características.** Neste exemplo serão empregados os componentes de sequência positiva e negativa das sequências de fasores representativos do 2º, 3º e 5º componentes harmônicos das correntes.

Uma vez definidos estes parâmetros, são formados os vetores extratores de características das correntes, de maneira similar à indicada na equação 56. Na equação 57 é apresentado o formato do vetor de características C para este exemplo. Para não complicar a notação não foi empregado um índice de tempo para especificar o instante em que este vetor é formado, contudo, a cada atualização da janela um novo vetor C deve ser calculado. Estes vetores serão utilizados no treinamento das redes neurais, constituindo a informação de entrada das redes na etapa de treinamento. Como se pode observar, é possível empregar apenas um componente sequencial ou qualquer combinação entre eles. O objetivo básico desta escolha é eliminar quaisquer informações redundantes, desnecessárias para a completa caracterização de cada tipo de falta de interesse.

$$C = \left[ \left| \dot{I}_+^{2^\circ h} \right| \quad \left| \dot{I}_+^{3^\circ h} \right| \quad \left| \dot{I}_+^{5^\circ h} \right| \quad \left| \dot{I}_-^{2^\circ h} \right| \quad \left| \dot{I}_-^{3^\circ h} \right| \quad \left| \dot{I}_-^{5^\circ h} \right| \quad \angle \dot{I}_+^{2^\circ h} \quad \angle \dot{I}_+^{3^\circ h} \quad \angle \dot{I}_+^{5^\circ h} \quad \angle \dot{I}_-^{2^\circ h} \quad \angle \dot{I}_-^{3^\circ h} \quad \angle \dot{I}_-^{5^\circ h} \right]^T \quad (57)$$

Para possibilitar o treinamento das redes é preciso estabelecer previamente quais janelas correspondem aos padrões de faltas. Dois métodos foram implementados. O primeiro consiste na observação do espectro de amplitudes dos componentes sequenciais dos harmônicos selecionados, o qual se modifica apreciavelmente quando a janela adentra a região das formas de onda correspondentes ao transitório das faltas. Outro método consiste na visualização do valor médio do espectro de amplitudes, conforme figura 31.



**Figura 31: Valor médio do espectro de amplitude dos componentes sequenciais selecionados.**

Neste caso, o valor médio dos 6 primeiros elementos do vetor  $C$ , dado pela equação 57, foi utilizado. Vê-se claramente que o conteúdo harmônico que caracteriza o transitório é substancialmente maior entre as posições 18 e 27. Após a posição 27 a falta entra em regime e o conteúdo harmônico se reduz a praticamente os mesmos níveis do período pré-falta (neste caso, em que não foi empregado o componente fundamental), em se tratando de faltas lineares. A informação que caracteriza a operação normal do sistema é extraída das posições entre 1 e 17. Adicionalmente, vê-se que este método permite identificar aproximadamente o instante de incidência da falta. Finalmente, através da equação 57 e dos dados das tabelas 3 e 4, referentes às saídas desejadas das redes, é fácil gerar um banco de dados para o treinamento das mesmas.

```

-----
----- SISTEMA DE DETECÇÃO DE FALTAS -----
SEGUNDA ETAPA - TREINAMENTO DAS REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS
-----
----- TREINAMENTO DA REDE NEURAL 1 -----
-----

IMPORTANTE - ESTA REDE POSSUI APENAS UM NEURÔNIO NA CAMADA DE SAÍDA.

-----

ENTRE COM O NÚMERO DE NEURÔNIOS POR CAMADA DA REDE, CONFORME EXEMPLO A SEGUIR:

                EXEMPLO:      [12  24  1]

NÚMERO DE NEURÔNIOS POR CAMADA:      [12 24 1]
ESCOLHA A FUNÇÃO DE ATIVAÇÃO DE CADA CAMADA:

FUNÇÃO LINEAR = 1 <<>> FUNÇÃO SIGMÓIDE = 2 <<>> FUNÇÃO TANGENTE HIPERBÓLICA = 3

FUNÇÃO DE ATIVAÇÃO DA 1º CAMADA:      1
FUNÇÃO DE ATIVAÇÃO DA 2º CAMADA:      3

```

**Figura 32: Escolha da arquitetura das redes utilizadas na detecção e classificação das faltas.**

A rede RNA\_1, neste exemplo, possui 12 neurônios na primeira camada oculta, 24 neurônios na segunda e 1 neurônio na terceira (camada de saída). A função de ativação linear foi escolhida para os neurônios da primeira camada oculta e a função tangente hiperbólica para a segunda camada oculta. A camada de saída possui função de ativação sigmoide fixa (figura 17), adequada para os padrões de saída desejados para as redes. Para este exemplo, o treinamento da rede RNA\_1 foi concluído com sucesso em 39 iterações. Para as mesmas condições, o treinamento da rede RNA\_2 foi concluído em 191 iterações. O número de iterações necessárias para a conclusão do treinamento varia bastante em função da complexidade da tarefa a ser executada por cada rede. Uma vez treinadas todas as redes tem início a etapa de validação do treinamento. Esta etapa consiste basicamente em utilizar as redes treinadas na detecção e classificação de faltas não utilizadas no processo de treinamento. Na figura 33 ilustra-se este procedimento para o exemplo em questão.

```

-----
----- SISTEMA DE DETECÇÃO DE FALTAS -----
TERCEIRA ETAPA - VALIDAÇÃO DO TREINAMENTO DAS REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS
-----

DESEJA UTILIZAR O ARQUIVO PADRÃO DE FALTAS SIMULADAS [CONJUNTO DE VALIDAÇÃO] ?

[ SIM = 1 ]   <<<<>>>   [ NÃO = 0 ]   <<<<>>>   0
-----
SELECIONE AS BARRAS QUE DEVEM SER UTILIZADAS PARA A VALIDAÇÃO DO TREINAMENTO DAS REDES:

    3    28    53    71    85    111    126    155    162    191    205    233    254    264    290
312    327    348    374    385    410    430    452    467    487    515    533    542    566    593
611    627    655    673    684    710    725    748    773    792    813    836

    EXEMPLO: [20 40 60 ...]

VETOR DE BARRAS EM FALTA = [28 233 452 684 836]

```

**Figura 33: Escolha das barras utilizadas na validação do treinamento.**

Em geral, todas as barras utilizadas na formação do banco de dados de validação do treinamento devem ser utilizadas. Neste exemplo, foram selecionadas apenas 5 destas barras. Na figura 34 ilustra-se a atuação do sistema de detecção e classificação de faltas para uma falta monofásica simulada na barra 28, indicando as saídas reais e aproximadas de todas as redes neurais. Para este exemplo, todas as faltas foram detectadas e classificadas corretamente. Deve-se observar que apenas os padrões faltosos identificados pelas redes são apresentados. Os padrões referentes ao regime permanente da falta não são utilizados na detecção e classificação uma vez que o conteúdo harmônico destes padrões, para faltas lineares, é em geral pequeno. No caso de faltas não-lineares estes padrões possivelmente seriam identificados, ainda que de fato esta afirmação não tenha sido testada neste trabalho. Como pode ser visto na figura 34, apenas os padrões de falta identificados pela rede RNA\_1 são utilizados na classificação. Neste exemplo, 10 padrões faltosos foram identificados consecutivamente pela rede RNA\_1, correspondendo ao período transitório das faltas. A classificação definitiva de uma falta não é feita com base na detecção de um único padrão faltoso, mas depende da detecção de vários padrões faltosos consecutivos correspondentes a um mesmo tipo de falta. A classificação ocorre pela comparação das saídas das redes RNA\_3 e RNA\_4 com as saídas geradas pela rede RNA\_2, sendo esta tarefa executada pelo bloco de pós-processamento.

```

% ----- %
Barra_28 >> FALTA SIMULADA - MONOFÁSICA_FASE_A
% ----- %
SAIDA REAL DA REDE NEURAL 1:
0.9564    0.91659    0.99958    0.99448    0.97557    0.97086    0.98265    0.99084    0.99678    0.99942

SAIDA APROXIMADA DA REDE NEURAL 1 = [1 1 1 1 1 1 1 1 1 1]
% ----- %
SAIDA REAL DA REDE NEURAL 2:
1.0000    1.0000    1.0000    0.9848    1.0000    0.9993    1.0000    1.0000    0.9999    1.0000
0.0139    0.0247    0.0147    0.0298    0.0005    0.0408    0.0081    0.0237    0.0007    0.0016
0.0040    0.0004    0.0000    0.0000    0.0111    0.0030    0.0000    0.0147    0.0002    0.0009

SAIDA APROXIMADA DA REDE NEURAL 2:
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

----- FALTA DETECTADA: MONOFÁSICA - FASE A -----
SAIDA REAL DA REDE NEURAL 3:
0.9998    1.0000    0.9986    0.9998    1.0000    0.9990    0.9999    0.9977    0.9988    0.9998
0.0007    0.0009    0.0005    0.0017    0.0013    0.0002    0.0007    0.0029    0.0007    0.0025
0.0003    0.0019    0.0039    0.0021    0.0009    0.0042    0.0028    0.0005    0.0063    0.0021

SAIDA APROXIMADA DA REDE NEURAL 3:
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
% ----- %

```

**Figura 34: Falta monofásica fase A simulada na barra 28.**

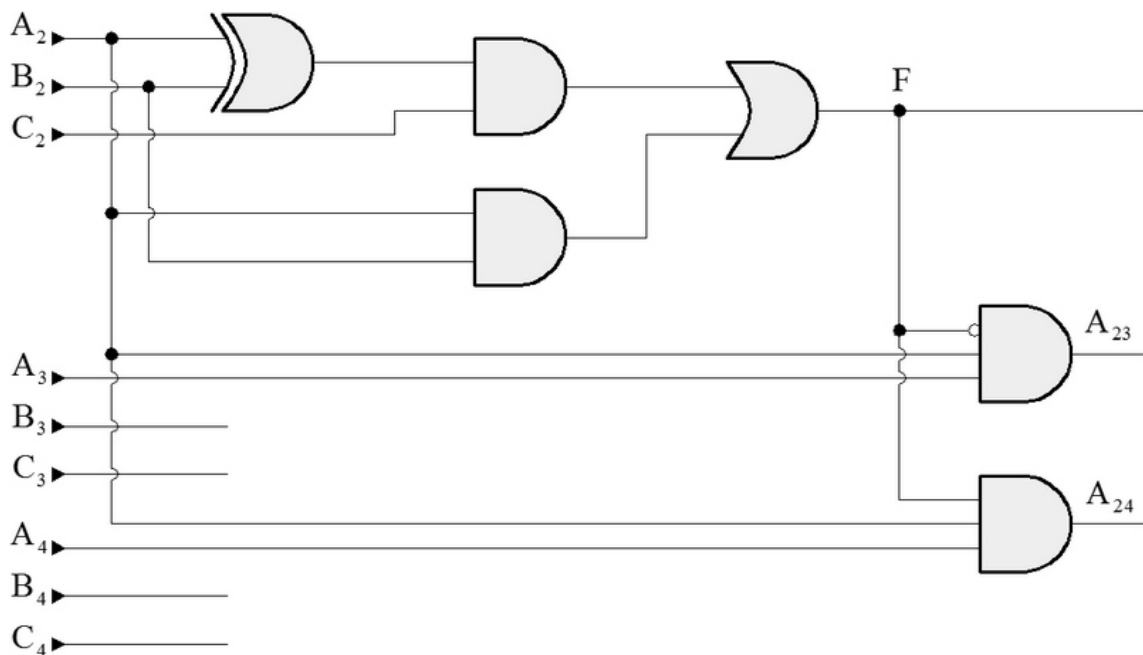
### 5.2.1. BLOCO DE PÓS-PROCESSAMENTO

A fim de processar os resultados gerados pelas redes foi adotada a seguinte aproximação: saídas superiores a 0,8 foram aproximadas para 1; saídas inferiores a 0,2 foram aproximadas para zero; saídas entre 0,2 e 0,8 inclusive, foram setadas em 0,5. Assim, é possível aplicar operações lógicas simples a todas as saídas diferentes de 0,5. Saídas iguais a 0,5 são consideradas imprecisas e descartadas na análise dos resultados. O bloco de pós-processamento é responsável por este ajuste e pela análise dos sinais assim obtidos e pode ser parcialmente implementado através de um circuito lógico bastante simples, como o ilustrado na figura 35. Não está indicada na figura a conversão das saídas das redes para valores binários. A variável F consiste em um bit de seleção determinado pelas saídas digitais da rede RNA\_2. Assume nível lógico zero se a saída atual da rede RNA\_2 indicar falta monofásica e nível lógico 1 em caso contrário. O bit de seleção F foi obtido da tabela 3 e corresponde à função lógica indicada na equação 58.

$$F = A_2 \oplus B_2 \cdot C_2 + A_2 \cdot B_2 \quad (58)$$

Na figura 35 as variáveis  $A_2$ ,  $B_2$  e  $C_2$  correspondem às saídas da rede RNA\_2, já convertidas a valores binários. A figura apresenta apenas a comparação entre os bits indicativos de falta envolvendo a fase A. Assim, se F apresentar nível lógico zero a variável

$A_{23}$ , saída de uma porta lógica AND, estará habilitada e indicará a comparação entre os bits  $A_2$  e  $A_3$ . Se a sequência  $A_2, B_2, C_2$  for igual à sequência  $A_{23}, B_{23}, C_{23}$  para  $F = 0$ , o padrão faltoso será validado. Observar que apenas 4 pinos de saída são necessários, uma vez que, por exemplo, os pinos  $A_{23}$  e  $A_{24}$  podem ser interligados. Observar ainda que se  $F = 0$ , em caso dos padrões faltosos indicados pela RNA\_2 e RNA\_3 serem iguais, necessariamente um único pino de saída indicará nível lógico 1. Se todos indicarem nível lógico zero pode-se inferir com segurança que os padrões faltosos comparados são diferentes. Se  $F = 1$ , a comparação é mais complexa e exige um circuito lógico adicional (também bastante simples, mas não indicado na figura). Portanto, o circuito apenas seleciona, com base nas saídas da rede RNA\_2, com qual rede será feita a comparação. Se a comparação validar o padrão indicado pela rede RNA\_2, este será admitido correto e armazenado em uma memória local. Somente após a análise e o armazenamento de uma quantidade predefinida de padrões faltosos consecutivos é que será gerado o diagnóstico definitivo da falta, conforme pode ser visto na figura 35.



**Figura 35: Parte de um possível pós-processador, implementado através de portas lógicas. Somente a comparação entre os bits que representam faltas envolvendo a fase A está indicada.**

Evidentemente este bloco constitui tão somente uma sugestão de implementação parcial do bloco de pós-processamento, podendo ser significativamente aperfeiçoado no caso de uma aplicação real ou abortado em favor de uma análise direta das saídas das redes, via *software*, através dos dados enviados ao centro de operação, sendo esta abordagem preferível pela flexibilidade e possibilidade de utilização de técnicas eficientes de análise destes dados, como por exemplo a aplicação de lógica *fuzzy*.

## 6. RESULTADOS

Diversos sistemas de detecção e classificação de faltas foram testados utilizando a metodologia apresentada. O principal objetivo dos testes realizados foi identificar uma combinação de componentes harmônicos e componentes sequenciais destes harmônicos que permitissem a detecção e classificação segura de todos os tipos de faltas simuladas, com baixo custo computacional. Como mencionado anteriormente, foram utilizadas 44 barras para a formação do banco de dados de simulações de faltas utilizado no treinamento das redes. Outras 42 barras foram empregadas na formação de um segundo banco de dados destinado a validar o treinamento e possibilitar a avaliação do desempenho das redes treinadas. Todas as faltas monofásicas foram simuladas com resistência de falta igual a  $40 \Omega$ . Já as faltas bifásicas e trifásicas foram simuladas com resistência de falta entre fases de  $1 \Omega$ . Não foram simuladas faltas do tipo bifásicas à terra. Os padrões de classificação das faltas estão indicados nas tabelas 3 e 4. As tabelas 5 e 6 apresentam 5 diferentes sistemas que obtiveram 100% de acerto na detecção e classificação das faltas pertencentes ao banco de dados de validação do treinamento.

Tabela 5: Parâmetros utilizados no projeto de 5 diferentes sistemas de detecção e classificação de faltas.

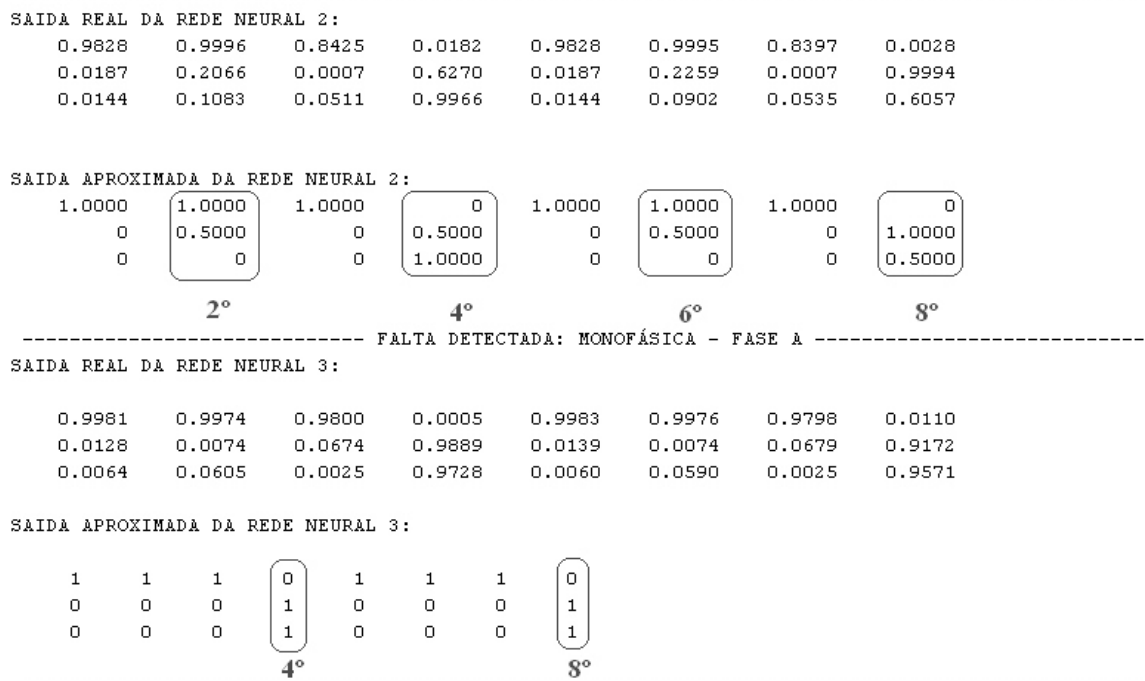
Sistema	SDF_1	SDF_2	SDF_3	SDF_4	SDF_5
Janela [p]	2	1	2	1	2
Passo	16	12	32	8	10
Harmônicos	1° a 7°	1° a 5°	1°, 3° e 5°	1° e 3°	1°, 3° e 5°
Sequências	Zero/Neg.	Pos./Neg.	Zero/Neg.	Zero /Neg.	Pos./Neg.

Na tabela 5 o sistema de detecção e classificação de faltas denominado SDF\_1 tem os seguintes parâmetros de operação: janela abrangendo 2 períodos completos do componente fundamental de cada corrente, suposta fixa em 60 Hz, sendo, portanto, o vetor de entrada E deste sistema composto por 128 amostras das correntes de cada fase, totalizando 384 amostras; janela atualizada a cada 16 novas amostras de cada corrente; harmônicos utilizados variando entre o 1° e o 7°, inclusive; utilização dos componentes de sequência zero e negativa das sequências de fasores representativos destes harmônicos.

Tabela 6: Arquitetura das redes neurais artificiais empregadas nos sistemas indicados na tabela 5.

Sistema	Arquitetura	Convergência [iterações]
SDF_1	[28-FL 56-TH 1/3-FS]	18-49-18-46
SDF_2	[20-FL 40-TH 1/3-FS]	20-61-21-50
SDF_3	[12-TH 24-TH 1/3-FS]	25-50-10-29
SDF_4	[08-FL 16-TH 1/3-FS]	24-244-55-141
SDF_5	[12-TH 1/3-FS]	26-183-56-135

A tabela 6 fornece, para o sistema SDF\_1, a arquitetura das redes acíclicas, tipo *perceptrons* de múltiplas camadas, treinadas com base nos parâmetros apresentados na tabela 5: redes neurais artificiais com três camadas (duas ocultas e uma de saída), sendo a primeira formada por 28 neurônios com função de ativação linear (FL), a segunda formada por 56 neurônios com função de ativação tangente hiperbólica (TH) e a camada de saída formada por 1 ou 3 neurônios, a depender da rede, com função de ativação sigmoide (FS); a convergência do treinamento da primeira rede ocorreu em 18 iterações do algoritmo de treinamento utilizado (*resilient backpropagation algorithm*); a convergência do treinamento das demais redes, RNA\_2, RNA\_3, RNA\_4, ocorreu em 49, 18 e 46 iterações, respectivamente. Apesar de ter sido utilizada uma resistência de falta de 40  $\Omega$  para as faltas monofásicas utilizadas no treinamento, a figura 36 mostra a saída do sistema SDF\_1 para uma falta monofásica simulada com resistência de falta de 400  $\Omega$  na barra 836, a mais distante da subestação. Por meio dessa figura é fácil perceber a importância da redundância inserida no sistema de classificação de faltas com a inclusão das redes RNA\_3 e RNA\_4. De fato, a rede RNA\_2 errou a classificação da falta em metade dos padrões apresentados, os quais correspondem ao período transitório da falta, enquanto a RNA\_3, especializada na identificação da fase envolvida em faltas monofásicas, errou apenas 2. A forma como se dá o processamento ou interpretação da informação contida na figura 36 é, portanto, essencial para a correta classificação da falta. Por exemplo, o segundo padrão faltoso classificado pela rede RNA\_2 deve ser descartado por conter uma saída setada em 0.5, considerada imprecisa pelos critérios adotados. Contudo, ao verificar a saída real da rede RNA\_2 correspondente a este valor verifica-se que esta se encontra muito próxima do valor máximo adotado como limite para aproximação ao nível lógico zero. O mesmo ocorre com o 6º padrão faltoso. É fácil inferir que um critério mais flexível, talvez empregando lógica *fuzzy*, pode levar a um melhor aproveitamento dos resultados gerados pelo sistema de detecção e classificação de faltas.



**Figura 36: Saída do sistema SDF\_1 para uma falta monofásica fase A simulada na barra 836, com resistência de falta de 400  $\Omega$ .**

Um resultado bastante interessante deve ser ressaltado: a precisão demonstrada pelo sistema SDF\_4. Este sistema, que emprega tão somente os componentes de sequência zero e negativa das sequências de fasores representativos do 1° e 3° harmônicos foi capaz de classificar corretamente todas as faltas constantes do banco de dados de validação. Com este sistema foi possível também detectar e classificar corretamente uma falta monofásica na fase A, com resistência de falta de 100  $\Omega$ , aplicada à barra 836. A rede falhou na detecção da mesma falta aplicada nas fases B e C. Contudo, para barras mais próximas à subestação, como por exemplo a barra 477, o sistema foi capaz de classificar corretamente faltas monofásicas com resistências de falta superiores a 100  $\Omega$ .

Em geral, os sistemas indicados nas tabelas 6 e 7 apresentaram bom desempenho para faltas com resistência inferior a 400  $\Omega$ . Para a detecção de faltas de alta impedância pode-se empregar um número maior de componentes harmônicos. Na figura 37 é apresentada a saída de um sistema de detecção e classificação de faltas no qual foram empregados os 10 primeiros componentes harmônicos das correntes. Este sistema utiliza janelas de 2 períodos, atualizada a cada 12 novas amostras. As redes neurais utilizadas possuem 40 neurônios na primeira camada, 80 na segunda e 1 ou 3 na terceira, conforme a rede, com funções de ativação tangente hiperbólica nas duas camadas ocultas e sigmoide na camada de saída. Para este sistema a convergência do treinamento da rede RNA\_1 ocorreu em 56 iterações, sendo necessárias, para as redes RNA\_2, RNA\_3 e RNA\_4, um total de 103, 41 e 102 iterações,

respectivamente. Pode-se verificar, com base nos resultados apresentados na figura 37, que o sistema de detecção e classificação de faltas assim definido é capaz de identificar e classificar corretamente faltas monofásicas de alta impedância com resistência igual a 800  $\Omega$ . Deve-se ressaltar aqui que o banco de dados de faltas monofásicas utilizado no treinamento desta rede somente continha simulações com resistência de falta de 40  $\Omega$ . Obviamente, caso sejam incluídas simulações com resistência de falta superior a 40  $\Omega$  no banco de dados de treinamento das redes, pode-se esperar a melhora do desempenho das mesmas na detecção de faltas de alta impedância. É possível verificar, através do resultado indicado pela figura 37, que a rede RNA\_2 sofre uma maior degradação de seu desempenho com o aumento da resistência de falta. Já a rede RNA\_3, especializada na detecção da fase envolvida nas faltas monofásicas, apresenta bom desempenho mesmo para resistências muito superiores as utilizadas em seu treinamento.

```

-----
SAIDA REAL DA REDE NEURAL 2:
  0.9948  0.9628  0.0002  1.0000  0.9977  0.6465  0.9999  0.0000  0.8701  0.9965
  0.0373  0.0000  1.0000  0.6321  0.9980  0.9820  0.0000  0.1535  0.2321  0.0014
  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0081  0.0000  0.0000  0.9974  0.0000  0.0536

SAIDA APROXIMADA DA REDE NEURAL 2:
  1.0000  1.0000  0  1.0000  1.0000  0.5000  1.0000  0  1.0000  1.0000
    0      0  1.0000  0.5000  1.0000  1.0000  0  0  0.5000  0
    0      0  0  0  0  0  0  1.0000  0  0
-----
FALTA DETECTADA: MONOFÁSICA - FASE A -----
SAIDA REAL DA REDE NEURAL 3:
  0.9386  0.9999  0.9929  0.9999  0.9176  0.1114  0.9992  0.0007  1.0000  0.9994
  0.0030  0.0000  0.0030  0.0001  0.0002  0.0873  0.0004  0.0000  0.0001  0.0001
  0.0001  0.0000  0.0000  0.0000  0.0509  0.0000  0.0000  0.9224  0.0000  0.0003

SAIDA APROXIMADA DA REDE NEURAL 3:
  1  1  1  1  1  0  1  0  1  1
  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
  0  0  0  0  0  0  0  1  0  0
-----

```

**Figura 37: Detecção de faltas de alta impedância através do emprego de um número maior de componentes harmônicos.**

Na tabela 7 apresenta-se o tempo médio requerido por cada sistema de detecção e classificação de faltas apresentado nas tabelas 5 e 6, para a classificação de uma falta monofásica na fase C, simulada na barra 477, com resistência de falta de 100  $\Omega$ . Os resultados foram obtidos por simulação dos sistemas de detecção e classificação de faltas depois de concluída a etapa de treinamento. Foram tomadas as médias sobre 100 simulações, para cada sistema. Todas as simulações computaram o tempo desde o carregamento dos arquivos *.txt*

que continham os dados das correntes de falta sobre 10 períodos do componente fundamental, sendo 5 períodos pré-falta e 5 pós-falta, até a apresentação na tela dos resultados obtidos, conforme figuras 48, 50 e 51. Este procedimento visa emular a operação do sistema em circunstâncias reais, nas quais os dados coletados devem ser enviados a um centro de operação para análise e apresentação dos resultados ao operador. Apenas a etapa concernente ao processamento dos dados no centro de operação foi computada. Supõe-se aqui que os dados correspondentes a oscilografia digital das faltas, abrangendo 5 ciclos pré-falta e 5 ciclos pós-falta são enviados ao centro de operação através de um canal exclusivo ou através de um link de alta velocidade. O computador utilizado possui processador Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU E4500 @2.20GHz (2CPUs), 1920 MB de memória RAM e sistema operacional Microsoft Windows XP Professional (5.1, Compilação 2600). Foi utilizada a versão 7.4.0.287 (R2007a) do MATLAB<sup>®</sup>.

Tabela 7: Tempo de resposta dos sistemas de detecção e classificação de faltas apresentados nas tabelas 5 e 6, para um falta monofásica aplicada à fase C da barra 477.

Sistema	SDF_1	SDF_2	SDF_3	SDF_4	SDF_5
<b>Tempo de Resposta</b> [ms]	178,5	171,3	142,0	133,6	111,5

Da tabela 7, é possível verificar que os sistemas de detecção e classificação de faltas possuem um tempo de resposta inversamente proporcional ao número de harmônicos utilizados (já que todos utilizaram o mesmo número de componentes sequenciais). O sistema SDF\_5, cujas redes possuem apenas 2 camadas, apresentou o menor tempo de resposta, como esperado. A diferença entre os tempos de resposta do SDF\_1 e SDF\_4 pode ser considerada pequena em função da arquitetura claramente mais complexa do primeiro. Se considerarmos somente o tempo médio de resposta das redes neurais utilizadas em cada sistema, teremos diferenças ainda menores. De fato, os tempos de resposta das redes neurais utilizadas no sistema SDF\_1 foram os seguintes: para a rede RNA\_1 foi de 5,22 ms, para a rede RNA\_2 foi de 5,14 ms e para a rede RNA\_3 foi de 5,25 ms. Para o sistema SDF\_4 tem-se, para a rede RNA\_1, 5,17 ms, para a rede RNA\_2, 5,10 ms e para a rede RNA\_3, 5,18 ms. Deve-se atentar para o fato de que cada sistema, SDF\_1 e SDF\_4, analisou o mesmo número de padrões faltosos para o período transitório da falta. Nas simulações, as redes RNA\_2 e RNA\_3 não operam em paralelo, como ocorreria no caso de uma implementação via *hardware* e, portanto, seus tempos de resposta devem ser somados. Logo, do tempo total de resposta do sistema SDF\_1 apenas 15,61 ms estão associados à operação das redes. Para o sistema SDF\_4

a operação das redes consumiu 15,45 ms. A pequena diferença está associada apenas às diferenças entre os números de neurônios utilizados em cada camada, uma vez que as funções de ativação e o número total de camadas utilizadas nas redes de ambos os sistemas foram iguais. Logo, pode-se afirmar que o maior atraso na resposta do sistema de detecção e classificação de faltas ocorre em função do pré-processamento dos sinais de entrada e, eventualmente, do pós-processamento, ou interpretação, dos resultados obtidos. Considerando ainda que os tempos indicados na tabela 7 correspondem à análise de 10 ciclos completos das correntes, sendo 5 ciclos pós-falta, e que os resultados gerados pelos sistemas de detecção e classificação consumiram em média 9 ciclos, verifica-se que o diagnóstico final das faltas deve ser obtido em um tempo inferior a 15 ciclos, deste o momento da ocorrência da falta, ou cerca de 250 ms. Caso se pretenda identificar e classificar as faltas em um tempo inferior pode-se adotar uma metodologia de envio de dados ao centro de operação ligeiramente diferente.

## 7. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia de desenvolvimento de um sistema de detecção e classificação de faltas em alimentadores de distribuição, baseada na utilização de redes neurais artificiais. Todas as etapas do projeto, conforme a metodologia proposta, estão assentadas sobre ferramentas de análise de sistemas elétricos de potência amplamente conhecidas e utilizadas em variadas aplicações. A detecção e a classificação de cada tipo de falta é feita através da análise das formas de onda das correntes, medidas apenas na saída da subestação. Para a classificação das falta é feito uso somente do período transitório das mesmas. Um vetor de características é obtido mediante a aplicação de duas ferramentas matemáticas bem conhecidas pelos engenheiros de proteção: a DFT e a decomposição em componentes simétricos. Inicialmente, e tomadas em conjunto, essas operações correspondem à aplicação de um operador linear a um vetor constituído por uma sequência de amostras das correntes de fase. Posteriormente, toda a informação considerada redundante para o processo de classificação é eliminada através da escolha de uma combinação de componentes sequenciais das sequências de fasores representativos de alguns componentes harmônicos selecionados. A definição dos componentes sequenciais e dos harmônicos de interesse é feita mediante a análise de resultados obtidos experimentalmente, através de um extenso banco de dados de simulações de faltas em um modelo de alimentador real de sistema de distribuição. Um ambiente de simulação capaz de permitir o ajuste interativo dos diversos parâmetros que influenciam o desempenho do sistema foi implementado. Para o modelo de alimentador de distribuição utilizado, várias arquiteturas de sistemas de detecção e classificação de faltas foram implementadas e testadas. Verificou-se assim que diferentes combinações de parâmetros resultaram em sistemas com desempenho satisfatório, aferido através da aplicação de tais sistemas na detecção e classificação de faltas pertencentes a um banco de dados de validação formado por simulações não constantes do banco de dados utilizado da etapa de treinamento das redes neurais.

Duas observações importantes podem ser feitas com base nos resultados apresentados. A primeira diz respeito à necessidade de poucos componentes harmônicos para a caracterização dos diversos tipos de faltas. De fato, com apenas o 1º e o 3º harmônicos foi possível classificar corretamente todos os tipos de faltas empregadas neste trabalho (tabela 5). A segunda consiste no fato de que apenas dois componentes sequenciais em geral são necessários para a caracterização das faltas. Experimentalmente verificou-se que as melhores combinações são: sequência zero e negativa ou sequência positiva e negativa. A utilização da

sequência zero em conjunto com a sequência positiva levou a um maior tempo necessário ao treinamento das redes e resultou em sistemas com um índice de falhas de classificação maior. A utilização de um único componente sequencial torna o treinamento das redes bastante demorado quando se pretende utilizar um número pequeno de harmônicos, muitas vezes não sendo mesmo possível concluir o treinamento com sucesso. Caso sejam utilizados mais harmônicos é possível treinar as redes com somente o componente de sequência negativa. Com os 10 primeiros componentes harmônicos foi possível implementar um sistema de detecção e classificação de faltas utilizando somente o componente de sequência negativa destes harmônicos e ainda assim obter 100% de acerto na classificação das faltas pertencentes ao banco de dados de validação. As redes pertencentes a este sistema possuíam a seguinte arquitetura: [20-TH 40-TH 1/3-FS]. Não foi possível obter o mesmo resultado utilizando somente o componente de sequência zero ou o componente de sequência positiva, o que em parte explica a razão das combinações envolvendo o componente de sequência negativa levarem à melhores resultados.

Outro ponto importante que deve ser ressaltado diz respeito à indisponibilidade de dados reais de faltas em quantidade suficiente para o treinamento das redes neurais, no caso em que se pretenda que tal treinamento se efetue com base em dados reais e não por meio de dados obtidos por simulação. O que se verificou, através de vários testes realizados, é que, devido a capacidade de generalização das redes, apenas uma pequena quantidade de faltas são realmente necessárias para assegurar o treinamento e um desempenho satisfatório. O sistema SDF\_5, cujos dados estão indicados nas tabelas 6 e 7, foi re-treinado com os dados de faltas simuladas nas barras 5, 20, 200, 400, 600 e 800, ou cerca 0,7% do total de barras simuladas, gerando um sistema de detecção e classificação que obteve 100% de acerto na classificação das faltas do banco de dados de validação. Portanto, pode-se supor que a utilização conjunta de dados simulados e dados obtidos por oscilografia digital constituiria um bom caminho para a formação do banco de dados de treinamento das redes.

O critério adotado para a classificação das faltas a partir das saídas geradas pelas redes neurais, o qual corresponde à operação do bloco de pós-processamento, consistiu basicamente em ajustar tais saídas conforme segue: saídas superiores a 0,8 foram setadas em 1; saídas inferiores a 0,2 foram setadas em 0 e saídas entre 0,2 e 0,8 inclusive foram setadas em 0,5. Todos os padrões faltosos que continham alguma saída setada em 0,5 foram ignorados na classificação da falta por serem considerados imprecisos. A partir dos demais padrões faltosos, correspondentes ao período transitório das faltas, a classificação final foi efetuada pela simples verificação do padrão de falta mais frequentemente encontrado. Esta

metodologia de análise dos resultados não pode ser considerada precisa. Portanto, pode-se adotar, no caso de uma implementação real desta metodologia, uma ferramenta de análise destes resultados mais efetiva. Uma evolução natural deste trabalho consistirá na aplicação de lógica *fuzzy* com este objetivo. Outra limitação que deverá ser eliminada diz respeito ao ponto de inserção das faltas. Todas as faltas simuladas utilizadas neste trabalho tiveram seu ponto de inserção definido em 90° elétricos em relação à tensão da fase A. Um novo banco de dados deverá então ser gerado considerando-se outros pontos de inserção. Também as faltas bifásicas à terra deverão ser incluídas neste novo banco de dados. Simulações com diferentes resistências de faltas, inclusive faltas de alta impedância, também deverão ser incluídas. Por fim, novos tipos de redes neurais poderão ser testadas para a comparação com os resultados obtidos pelas redes tipo perceptrons de múltiplas camadas, com especial interesse pelas redes do tipo ARTMAP Nebulosa.

Uma importante função de um sistema de diagnóstico de faltas consiste na estimativa do ponto de ocorrência da falta ao longo do alimentador. Neste trabalho, focado na detecção e classificação das faltas, não foi apresentada tal funcionalidade. Contudo, já está em andamento o desenvolvimento de um bloco adicional, responsável pela localização das faltas, o qual deverá em breve ser acrescentado a esta metodologia de detecção e classificação de faltas para gerar um sistema completo de diagnóstico de faltas baseado na aplicação de redes neurais artificiais.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERMAN, W. J. **Fundamentals of automation systems & current trends in substation automation**. IEEE Seção Sul Brasil - Capítulo de Potência de São Paulo. Volume I. Fevereiro de 2006.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3.ed. Brasília, DF: ANEEL, 2008. 236 p.

ALTRAN, A. B. **Aplicação de funções de base radial em problemas de cargas elétricas via redes neurais artificiais**. 2005. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) -. Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

ANDERSON, P. M. **Analysis of faulted power systems**. New York: University Press, 1973. 514 p. (IEEE Press power system engineering series).

ARAÚJO, C. A. S.; SOUSA, F. C.; CÂNDIDO, J. R. R.; DIAS, M. P. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 2.ed. São Paulo: Interciência, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5460: sistemas elétricos de potência**. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. 63 p.

BRAGA, A. P.; LUDERMIR, T. B.; CARVALHO, A. C. P. L. F. **Redes neurais artificiais – teoria e aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

BRETAS, A. S.; SALIM, R. H. Um novo método de localização de faltas para sistemas de distribuição com geração distribuída baseado na impedância aparente de sequência positiva. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 17, 2006, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: S.n., 2006.

BO, Z. Q.; AGGANVAL, R. K.; JOHNS, A. T.; YU, H.; SONG Y. H. A new approach to phase selection using fault generated high frequency noise and neural networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v.12, n.1, p.106-115, 1997.

CARDOSO JR, G.; ROLIM, J. G.; ZÜRN, H. H. Diagnóstico de faltas em sistemas de potência: definição do problema e abordagens via inteligência artificial. **Revista Controle & Automação**, Campinas, v.15, n.2, p.215-229, 2004.

COMPANHIA ENERGÉTICA DO CEARÁ - COELCE. **Padrão de subestação PS – 052/2003: detalhes de instalação e montagem de equipamentos e materiais 72,5 – 15 kV**. Ceará, 2003. 166p.

DECANINI, J. G. M. S. **Detecção e classificação de faltas de curto-circuito em sistemas de distribuição de energia elétrica usando lógica nebulosa**. 2008. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

DEMUTH, H.; BEALE, M. **Neural network toolbox**. User's Guide, Version 3.0. The MathWorks Inc, 1998.

DOLA, H. M.; CHOWDHURY, B. H. **Data mining for distribution system fault classification**. in Power Symposium, 2005 - Proceedings of the 37th Annual North American. Publication Date: 23-25 Oct. 2005 on pages: 457- 462, IEEE. 2005.

ELLIOTT, D. F.; RAO, K. R. **Fast Transforms: algorithms, analyses and applications**. London: Academic Press, 1982. 488 p.

FLÓREZ, J. J. M.; ESPAÑA, G. M.; LONDOÑO, S. P. Classification methodology and feature selection to assist fault location in power distribution systems. **Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia**, n.44, p.83-96, 2008.

GOUVÊA, M. R. O. **Sistema elétrico**. Disponível em: [http://www.elerotec.pea.usp.br/files/25\\_SistemaEletrico.pdf](http://www.elerotec.pea.usp.br/files/25_SistemaEletrico.pdf). Acesso em: 08 nov. 2006.

HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e prática**. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

HOU, D. **Detecção de faltas de alta impedância nos sistemas de distribuição de energia**. Disponível em: [http://www.selinc.com.br/art\\_tecnicos/6248\\_DetectionHigh-Impedance\\_DH\\_20060914.pdf](http://www.selinc.com.br/art_tecnicos/6248_DetectionHigh-Impedance_DH_20060914.pdf). Acesso em: 17 jul. 2008.

HSU, H. P. **Análise de Fourier**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1972.

KASIKCI, I. **Short circuits in power systems: a practical guide to IEC 60 909**. Weinheim: Wiley - VCH Verlag-Gmbh, 2002.

LOPES, M. L. M. **Desenvolvimento de redes neurais para previsão de cargas elétricas de sistemas de energia elétrica**. 2005. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

LOTUFO, A. D. P. **Análise de sensibilidade por redes neurais para estudos de estabilidade transitória de sistemas elétricos de potência**. 2004. 133 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações elétricas industriais**. 7.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

MAMEDE, J. P. **Previsão da manutenção de disjuntores dos alimentadores de distribuição de energia elétrica pelo método de curto-circuito probabilístico**. 2004. 75 f Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

MCDONALD, J. R.; BURT, G. M.; YOUNG, D. J. Alarm processing and fault diagnosis using knowledge based systems for transmission and distribution network control. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v.7, n.3, p.1292-1298, 1992.

MENDEL, J. M. Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial. **Proceedings of the Ieee**, New York, v. 83, n.3, p.345-377, 1995. Disponível em: <[http://sipi.usc.edu/~mendel/publications/FLS\\_Engr\\_Tutorial\\_Errata.pdf](http://sipi.usc.edu/~mendel/publications/FLS_Engr_Tutorial_Errata.pdf)>. Acesso em: 25 jun. 2009.

MESA, E. B. M.; SCHILLING, M. T.; SOUZA, J. C. S.; FILHO, M. B. C. Utilização de um modelo neuro-fuzzy para a localização de defeitos em sistemas de potência. **Revista Controle & Automação**, Campinas, v.17, n.1, p.103-114, 2006.

MOMOH, J. A.; EL-HAWARY, M. E. **Electric systems, dynamics, and stability with artificial intelligence applications**. New York: Marcel Dekker, 2000.

MORETO, M. **Localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia: uma metodologia baseada em redes neurais artificiais**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A. **Circuitos elétricos**. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

NORMA ND.78 **Proteção de redes aéreas de distribuição**. Versão 01, Agosto de 2008. ELEKTRO - Eletricidade e Serviços S.A.

NUNES, R. A. F.; COUTINHO, I. P. Curto-circuito probabilístico: técnicas e aplicações. In: SEMINÁRIO TÉCNICO DE PROTEÇÃO E CONTROLE, 3, 1991, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1991.

OLESKOVICZ, M.; AGGARWAL, R. K.; COURY, D. V. O emprego de redes neurais artificiais na detecção, classificação e localização de faltas em linhas de transmissão. **Revista Controle & Automação**, Campinas, v.14, n.2, p.138-150, 2003.

OLIVEIRA, C. C. B.; SCHMIDT, H. P.; KAGAN, N.; ROBBA, E. J. **Introdução a sistemas elétricos de potência – componentes simétricas**. 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2000.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W.; BUCK, J. R. **Discrete-time signal processing**. 2.ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999.

ORSINI, L. Q. O. **Curso de circuitos elétricos**. São Paulo: Edgard Blücher, 1994.

PÁDUA, M. S.; DECKMANN, S. M.; LOPES, A. L.; MARAFÃO, F. P.; MOREIRA, A. C. Metodologia para identificação do componente fundamental da tensão da rede baseada no algoritmo recursivo da TDF. **Revista Controle & Automação**, Campinas, v.18, n.3, p.381-396, 2007.

PARADELO JÚNIOR, R. C.; SCHMIDT, H. P. Proteção de sobrecorrente em sistemas de distribuição de energia elétrica através de abordagem probabilística. **IEEE Latin America Transactions**, New York, v.5, n.8, p.599-604, 2007.

PEREIRA, R. A. F. **Localização de faltas em alimentadores de distribuição de energia elétrica usando medições esparsas de tensões**. 2007. 131 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.

PRODIST - Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional - **Módulo 8: Qualidade da energia elétrica**. Resolução nº 345/2008.

SANTOSO, S.; POWERS, E. J.; BHATT, S. C. Characterization of distribution power quality events with Fourier and wavelet transforms. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v.15, n.1, p.247-254, 2000.

SEGATTO, E. C.; COURY, D. V. Redes neurais aplicadas a relés diferenciais para transformadores de potência. **Revista Controle & Automação**, Campinas, v.19, n.1. p.93-106, 2008.

SENGER, E. C.; MANASSERO JÚNIOR, G.; GOLDEMBERG, C.; PELLINI, E. L. Automated fault location system for primary distribution networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v.20, n.2, p.1332-1340, 2005.

SHORT, T. A. **Electric power distribution equipment and systems**. Broken Sound Parkway: Taylor & Francis Group, 2006.

SILVA, K. M.; BRITO, N. S. D.; COSTA, F. B.; SOUZA, B. A.; DANTAS, K. M. C.; SILVA, S. S. B. Detecção e classificação de faltas a partir da análise de registros oscilográficos via redes neurais artificiais e transformada wavelet. **Revista Controle & Automação**, Campinas, v.18, n.2, p.163-172, 2007.

SILVA, T. E.; BAPTISTA, A. O. S. A padronização dos projetos eletromecânicos das subestações da CEMIG e sua implantação no CAD. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 14, 1997, Belém-PA. **Anais...** Belém: S.n., 1997.

SILVEIRA, M. C. G. **Análise de estabilidade transitória de sistemas elétricos por redes neurais ARTMAP nebulosas modulares**. 2003. 92 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2003.

TAN, L. **Digital signal processing - fundamentals and applications**. New York: Elsevier, 2008. 820p.

YANG, H. T.; CHANG, W. Y.; HUANG, C. L. On-line fault diagnosis of power substation using connectionist expert system. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v.10, n.1, p.323-331, 1995.

## 9. APÊNDICE – DADOS DO ALIMENTADOR

Na tabela 1, apresentada no capítulo 5, estão indicados os valores de tensão e corrente, em pu, que caracterizam o estado pré-falta do alimentador utilizado como modelo. A figura 25 apresenta o traçado da rede primária deste alimentador. Como já mencionado, este alimentador possui 836 barras e tensão nominal de operação de 11,4 kV. Na tabela 8 apresentam-se os dados do alimentador, utilizados no cálculo das correntes de curto-circuito através do *software* ATP, versão 1.01 (Copyright(c) 2002 - *Hajime Urai & Japanese ATP User Group*). Na tabela A todas as resistências e reatâncias são dadas em Ohms e as distâncias (**Dist.**) em metros.

Tabela 8: Dados do alimentador real utilizado como modelo.

B <sub>i</sub>	B <sub>r</sub>	Dist.	R <sub>aa</sub>	X <sub>aa</sub>	R <sub>ab</sub>	X <sub>ab</sub>	R <sub>ac</sub>	X <sub>ac</sub>	R <sub>bb</sub>	X <sub>bb</sub>	R <sub>bc</sub>	X <sub>bc</sub>	R <sub>cc</sub>	X <sub>cc</sub>
000	001	-	0,0035	0,1858	-0,0017	-0,0149	-0,0017	-0,0149	0,0035	0,1858	-0,0017	-0,0149	0,0035	0,1858
001	002	-	0,0035	0,1858	-0,0017	-0,0149	-0,0017	-0,0149	0,0035	0,1858	-0,0017	-0,0149	0,0035	0,1858
002	003	110,7	0,0548	0,1024	0,0066	0,0757	0,0066	0,0698	0,0548	0,1024	0,0066	0,0757	0,0548	0,1024
003	004	70,2	0,0173	0,0624	0,0041	0,0479	0,0041	0,0443	0,0173	0,0624	0,0041	0,0479	0,0173	0,0624
004	005	227,3	0,0562	0,2022	0,0135	0,1551	0,0135	0,1434	0,0562	0,2022	0,0135	0,1551	0,0562	0,2022
005	006	627,6	0,1561	0,5519	0,0372	0,4282	0,0372	0,3954	0,1561	0,5519	0,0372	0,4282	0,1561	0,5519
006	007	564,3	0,1396	0,5007	0,0335	0,3850	0,0335	0,3555	0,1396	0,5007	0,0335	0,3850	0,1396	0,5007
007	008	273,1	0,0674	0,2428	0,0160	0,1864	0,0160	0,1721	0,0674	0,2428	0,0160	0,1864	0,0674	0,2428
008	009	534,4	0,1318	0,4753	0,0317	0,3643	0,0317	0,3368	0,1318	0,4753	0,0317	0,3643	0,1318	0,4753
009	010	50,9	0,0125	0,0452	0,0030	0,0347	0,0030	0,0321	0,0125	0,0452	0,0030	0,0347	0,0125	0,0452
010	011	556,5	0,1373	0,4948	0,0329	0,3807	0,0329	0,3507	0,1373	0,4948	0,0329	0,3798	0,1373	0,4948
011	012	263,1	0,0651	0,2340	0,0155	0,1809	0,0155	0,1662	0,0651	0,2340	0,0155	0,1795	0,0651	0,2340
012	013	219,0	0,0540	0,1947	0,0131	0,1489	0,0131	0,1247	0,0540	0,1947	0,0131	0,1344	0,0540	0,1947
013	014	67,5	0,0167	0,0601	0,0040	0,0477	0,0040	0,0355	0,0167	0,0601	0,0040	0,0370	0,0167	0,0601
014	015	294,1	0,0727	0,2616	0,0175	0,1923	0,0175	0,1807	0,0727	0,2616	0,0175	0,2006	0,0727	0,2616
015	016	560,0	0,1383	0,4981	0,0331	0,3705	0,0331	0,3466	0,1383	0,4981	0,0331	0,3819	0,1383	0,4981
016	017	205,1	0,0505	0,1824	0,0122	0,1400	0,0122	0,1292	0,0505	0,1824	0,0122	0,1400	0,0505	0,1824
017	018	60,8	0,0151	0,0541	0,0036	0,0415	0,0036	0,0383	0,0151	0,0541	0,0036	0,0415	0,0151	0,0541
018	019	130,4	0,0321	0,1159	0,0078	0,0889	0,0078	0,0821	0,0321	0,1159	0,0078	0,0889	0,0321	0,1159
019	020	146,7	0,0362	0,1304	0,0087	0,1000	0,0087	0,0925	0,0362	0,1304	0,0087	0,1000	0,0362	0,1304
020	021	115,1	0,0284	0,1025	0,0067	0,0776	0,0067	0,0720	0,0284	0,1025	0,0067	0,0785	0,0284	0,1025
021	022	62,4	0,0154	0,0555	0,0037	0,0416	0,0037	0,0388	0,0154	0,0555	0,0037	0,0425	0,0154	0,0555
022	023	177,7	0,0439	0,1581	0,0105	0,1213	0,0105	0,1120	0,0439	0,1581	0,0105	0,1213	0,0439	0,1581
023	024	83,1	0,0205	0,0739	0,0048	0,0567	0,0048	0,0523	0,0205	0,0739	0,0048	0,0567	0,0205	0,0739
024	025	146,6	0,0361	0,1304	0,0085	0,0999	0,0085	0,0924	0,0361	0,1304	0,0085	0,0999	0,0361	0,1304
025	026	87,5	0,0970	0,0885	0,0051	0,0597	0,0051	0,0552	0,0970	0,0885	0,0051	0,0597	0,0970	0,0885
026	027	38,4	0,0426	0,0388	0,0023	0,0262	0,0023	0,0242	0,0426	0,0388	0,0023	0,0262	0,0426	0,0388
027	028	73,5	0,0816	0,0743	0,0043	0,0502	0,0043	0,0463	0,0816	0,0743	0,0043	0,0502	0,0816	0,0743
028	029	37,6	0,0417	0,0380	0,0022	0,0256	0,0022	0,0237	0,0417	0,0380	0,0022	0,0256	0,0417	0,0380
029	030	160,0	0,1776	0,1619	0,0094	0,1092	0,0094	0,1008	0,1776	0,1619	0,0094	0,1092	0,1776	0,1619
030	031	132,7	0,1472	0,1343	0,0078	0,0905	0,0078	0,0836	0,1472	0,1343	0,0078	0,0905	0,1472	0,1343
031	032	180,3	0,2000	0,1823	0,0107	0,1230	0,0107	0,1136	0,2000	0,1823	0,0107	0,1230	0,2000	0,1823
027	033	48,1	0,0533	0,0486	0,0029	0,0328	0,0029	0,0303	0,0533	0,0486	0,0029	0,0328	0,0533	0,0486
023	034	35,3	0,0088	0,0309	0,0021	0,0241	0,0021	0,0222	0,0088	0,0309	0,0021	0,0241	0,0088	0,0309
034	035	45,9	0,0113	0,0408	0,0027	0,0313	0,0027	0,0289	0,0113	0,0408	0,0027	0,0313	0,0113	0,0408
035	036	148,8	0,0367	0,1325	0,0088	0,1015	0,0088	0,0938	0,0367	0,1325	0,0088	0,1015	0,0367	0,1325
036	037	134,4	0,0332	0,1195	0,0080	0,0917	0,0080	0,0846	0,0332	0,1195	0,0080	0,0917	0,0332	0,1195
037	038	78,8	0,0875	0,0797	0,0047	0,0538	0,0047	0,0496	0,0875	0,0797	0,0047	0,0538	0,0875	0,0797
036	039	23,6	0,0262	0,0239	0,0014	0,0161	0,0014	0,0149	0,0262	0,0239	0,0014	0,0161	0,0262	0,0239
012	040	29,9	0,0074	0,0266	0,0018	0,0204	0,0018	0,0188	0,0074	0,0266	0,0018	0,0204	0,0074	0,0266
040	041	576,9	0,3551	0,5750	0,0341	0,3920	0,0341	0,3621	0,3551	0,5750	0,0341	0,3935	0,3551	0,5750
041	042	202,9	0,1249	0,2021	0,0120	0,1385	0,0120	0,1278	0,1249	0,2021	0,0120	0,1385	0,1249	0,2021

042	043	256,5	0,1579	0,2555	0,0152	0,1750	0,0152	0,1616	0,1579	0,2555	0,0152	0,1750	0,1579	0,2555
043	044	209,3	0,1288	0,2085	0,0124	0,1428	0,0124	0,1319	0,1288	0,2085	0,0124	0,1428	0,1288	0,2085
044	045	113,4	0,0698	0,1130	0,0067	0,0774	0,0067	0,0714	0,0698	0,1130	0,0067	0,0774	0,0698	0,1130
045	046	125,8	0,0774	0,1253	0,0074	0,0858	0,0074	0,0793	0,0774	0,1253	0,0074	0,0858	0,0774	0,1253
046	047	216,1	0,1330	0,2153	0,0128	0,1474	0,0128	0,1361	0,1330	0,2153	0,0128	0,1474	0,1330	0,2153
047	048	522,3	0,3213	0,5203	0,0309	0,3563	0,0309	0,3291	0,3213	0,5203	0,0309	0,3563	0,3213	0,5203
048	049	457,3	0,2813	0,4557	0,0271	0,3214	0,0271	0,3095	0,2813	0,4557	0,0271	0,2722	0,2813	0,4557
049	050	100,6	0,0760	0,1013	0,0060	0,0686	0,0060	0,0634	0,0760	0,1013	0,0060	0,0686	0,0760	0,1013
050	051	352,8	0,2664	0,3551	0,0209	0,2485	0,0209	0,2400	0,2664	0,3551	0,0209	0,2079	0,2664	0,3551
051	052	35,4	0,0267	0,0356	0,0021	0,0242	0,0021	0,0223	0,0267	0,0356	0,0021	0,0242	0,0267	0,0356
052	053	102,6	0,0775	0,1033	0,0061	0,0754	0,0061	0,0669	0,0775	0,1033	0,0061	0,0700	0,0775	0,1033
053	054	78,5	0,0593	0,0790	0,0046	0,0535	0,0046	0,0494	0,0593	0,0790	0,0046	0,0535	0,0593	0,0790
054	055	33,6	0,0254	0,0338	0,0020	0,0229	0,0020	0,0212	0,0254	0,0338	0,0020	0,0229	0,0254	0,0338
055	056	28,9	0,0178	0,0288	0,0017	0,0197	0,0017	0,0182	0,0178	0,0288	0,0017	0,0197	0,0178	0,0288
056	057	11,1	0,0068	0,0111	0,0007	0,0076	0,0007	0,0070	0,0068	0,0111	0,0007	0,0076	0,0068	0,0111
057	058	356,9	0,2696	0,3593	0,0212	0,2435	0,0212	0,2248	0,2696	0,3593	0,0212	0,2435	0,2696	0,3593
058	059	250,6	0,1893	0,2524	0,0148	0,1710	0,0148	0,1579	0,1893	0,2524	0,0148	0,1710	0,1893	0,2524
059	060	464,3	0,3507	0,4673	0,0275	0,3167	0,0275	0,2926	0,3507	0,4673	0,0275	0,3167	0,3507	0,4673
060	061	101,2	0,0764	0,1019	0,0060	0,0690	0,0060	0,0638	0,0764	0,1019	0,0060	0,0690	0,0764	0,1019
061	062	27,9	0,0309	0,0282	0,0017	0,0190	0,0017	0,0176	0,0309	0,0282	0,0017	0,0190	0,0309	0,0282
062	063	129,8	0,1440	0,1313	0,0077	0,0886	0,0077	0,0818	0,1440	0,1313	0,0077	0,0886	0,1440	0,1313
063	064	319,6	0,3545	0,3233	0,0189	0,2181	0,0189	0,2014	0,3545	0,3233	0,0189	0,2181	0,3545	0,3233
064	065	141,4	0,1569	0,1429	0,0084	0,0964	0,0084	0,0891	0,1569	0,1429	0,0084	0,0964	0,1569	0,1429
065	066	85,0	0,0943	0,0860	0,0051	0,0580	0,0051	0,0536	0,0943	0,0860	0,0051	0,0580	0,0943	0,0860
066	067	18,3	0,0203	0,0185	0,0011	0,0125	0,0011	0,0115	0,0203	0,0185	0,0011	0,0125	0,0203	0,0185
066	068	14,0	0,0155	0,0142	0,0008	0,0096	0,0008	0,0088	0,0155	0,0142	0,0008	0,0096	0,0155	0,0142
065	069	215,4	0,2389	0,2180	0,0128	0,1470	0,0128	0,1357	0,2389	0,2180	0,0128	0,1470	0,2389	0,2180
069	070	87,3	0,0968	0,0883	0,0052	0,0596	0,0052	0,0551	0,0968	0,0883	0,0052	0,0596	0,0968	0,0883
070	071	89,0	0,0987	0,0899	0,0053	0,0607	0,0053	0,0560	0,0987	0,0899	0,0053	0,0607	0,0987	0,0899
071	072	41,9	0,0465	0,0423	0,0025	0,0285	0,0025	0,0264	0,0465	0,0423	0,0025	0,0285	0,0465	0,0423
072	073	10,1	0,0112	0,0102	0,0006	0,0069	0,0006	0,0064	0,0112	0,0102	0,0006	0,0069	0,0112	0,0102
072	074	3,7	0,0041	0,0037	0,0002	0,0025	0,0002	0,0023	0,0041	0,0037	0,0002	0,0025	0,0041	0,0037
074	075	139,1	0,1543	0,1407	0,0082	0,0949	0,0082	0,0877	0,1543	0,1407	0,0082	0,0949	0,1543	0,1407
074	076	259,8	0,4303	0,2619	0,0154	0,1773	0,0154	0,1637	0,4303	0,2619	0,0154	0,1773	0,4303	0,2619
071	077	22,1	0,0245	0,0224	0,0013	0,0151	0,0013	0,0139	0,0245	0,0224	0,0013	0,0151	0,0245	0,0224
071	078	41,7	0,0463	0,0421	0,0025	0,0285	0,0025	0,0263	0,0463	0,0421	0,0025	0,0285	0,0463	0,0421
070	079	21,5	0,0239	0,0217	0,0013	0,0147	0,0013	0,0135	0,0239	0,0217	0,0013	0,0147	0,0239	0,0217
049	080	111,2	0,1842	0,1121	0,0066	0,0777	0,0066	0,0708	0,1842	0,1121	0,0066	0,0759	0,1842	0,1121
080	081	386,7	0,6406	0,3897	0,0228	0,2637	0,0228	0,2436	0,6406	0,3897	0,0228	0,2637	0,6406	0,3897
081	082	132,8	0,2199	0,1339	0,0079	0,0919	0,0079	0,0842	0,2199	0,1339	0,0079	0,0906	0,2199	0,1339
082	083	647,8	1,0730	0,6532	0,0384	0,4419	0,0384	0,4081	1,0730	0,6532	0,0384	0,4419	1,0730	0,6532
083	084	181,9	0,3012	0,1833	0,0107	0,1292	0,0107	0,1167	0,3012	0,1833	0,0107	0,1241	0,3012	0,1833
025	085	71,4	0,0177	0,0635	0,0043	0,0487	0,0043	0,0450	0,0177	0,0635	0,0043	0,0487	0,0177	0,0635
085	086	77,3	0,0191	0,0687	0,0045	0,0527	0,0045	0,0487	0,0191	0,0687	0,0045	0,0527	0,0191	0,0687
086	087	238,7	0,0589	0,2123	0,0142	0,1629	0,0142	0,1505	0,0589	0,2123	0,0142	0,1629	0,0589	0,2123
087	088	350,7	0,0866	0,3120	0,0208	0,2393	0,0208	0,2211	0,0866	0,3120	0,0208	0,2393	0,0866	0,3120
088	089	100,3	0,0247	0,0891	0,0060	0,0685	0,0060	0,0631	0,0247	0,0891	0,0060	0,0685	0,0247	0,0891
089	090	132,1	0,0326	0,1174	0,0078	0,0901	0,0078	0,0832	0,0326	0,1174	0,0078	0,0901	0,0326	0,1174
090	091	197,5	0,0487	0,1756	0,0116	0,1347	0,0116	0,1244	0,0487	0,1756	0,0116	0,1347	0,0487	0,1756
091	092	65,6	0,0162	0,0584	0,0038	0,0448	0,0038	0,0413	0,0162	0,0584	0,0038	0,0448	0,0162	0,0584
092	093	202,2	0,0500	0,1799	0,0118	0,1372	0,0118	0,1270	0,0500	0,1799	0,0118	0,1381	0,0500	0,1799
093	094	73,1	0,0181	0,0650	0,0043	0,0487	0,0043	0,0454	0,0181	0,0650	0,0043	0,0499	0,0181	0,0650
094	095	22,9	0,0057	0,0204	0,0014	0,0156	0,0014	0,0144	0,0057	0,0204	0,0014	0,0156	0,0057	0,0204
095	096	133,7	0,0330	0,1188	0,0079	0,0912	0,0079	0,0841	0,0330	0,1188	0,0079	0,0912	0,0330	0,1188
096	097	196,4	0,0485	0,1747	0,0116	0,1339	0,0116	0,1238	0,0485	0,1747	0,0116	0,1339	0,0485	0,1747
097	098	59,7	0,0662	0,0604	0,0036	0,0407	0,0036	0,0376	0,0662	0,0604	0,0036	0,0407	0,0662	0,0604
098	099	121,6	0,1285	0,1229	0,0072	0,0830	0,0072	0,0766	0,1285	0,1229	0,0072	0,0830	0,1285	0,1229
099	100	80,2	0,0606	0,0808	0,0048	0,0584	0,0048	0,0521	0,0606	0,0808	0,0048	0,0547	0,0606	0,0808
100	101	381,8	0,4238	0,3863	0,0225	0,2604	0,0225	0,2405	0,4238	0,3863	0,0225	0,2604	0,4238	0,3863
101	102	428,0	0,4748	0,4329	0,0254	0,2920	0,0254	0,2697	0,4748	0,4329	0,0254	0,2920	0,4748	0,4329
102	103	337,1	0,3908	0,3408	0,0199	0,2300	0,0199	0,2123	0,3908	0,3408	0,0199	0,2300	0,3908	0,3408
103	104	10,6	0,0176	0,0107	0,0006	0,0072	0,0006	0,0067	0,0176	0,0107	0,0006	0,0072	0,0176	0,0107
104	105	13,5	0,0224	0,0136	0,0008	0,0099	0,0008	0,0088	0,0224	0,0136	0,0008	0,0092	0,0224	0,0136
105	106	30,0	0,0497	0,0302	0,0018	0,0205	0,0018	0,0189	0,0497	0,0302	0,0018	0,0205	0,0497	0,0302

102	107	120,3	0,1993	0,1213	0,0071	0,0884	0,0071	0,0784	0,1993	0,1213	0,0071	0,0821	0,1993	0,1213
099	108	116,7	0,1294	0,1180	0,0070	0,0802	0,0070	0,0718	0,1294	0,1180	0,0070	0,0773	0,1294	0,1180
108	109	425,5	0,4721	0,4306	0,0253	0,2901	0,0253	0,2679	0,4721	0,4306	0,0253	0,2901	0,4721	0,4306
109	110	157,7	0,1750	0,1596	0,0095	0,1076	0,0095	0,0994	0,1750	0,1596	0,0095	0,1076	0,1750	0,1596
110	111	58,9	0,0654	0,0596	0,0035	0,0401	0,0035	0,0371	0,0654	0,0596	0,0035	0,0401	0,0654	0,0596
111	112	82,7	0,0918	0,0837	0,0049	0,0564	0,0049	0,0521	0,0918	0,0837	0,0049	0,0564	0,0918	0,0837
112	113	112,3	0,1247	0,1135	0,0066	0,0766	0,0066	0,0708	0,1247	0,1135	0,0066	0,0766	0,1247	0,1135
113	114	119,6	0,1327	0,1210	0,0072	0,0816	0,0072	0,0753	0,1327	0,1210	0,0072	0,0816	0,1327	0,1210
114	115	9,9	0,0110	0,0100	0,0006	0,0068	0,0006	0,0062	0,0110	0,0100	0,0006	0,0068	0,0110	0,0100
114	116	60,6	0,0672	0,0613	0,0036	0,0414	0,0036	0,0382	0,0672	0,0613	0,0036	0,0414	0,0672	0,0613
070	117	56,7	0,0629	0,0574	0,0033	0,0387	0,0033	0,0357	0,0629	0,0574	0,0033	0,0387	0,0629	0,0574
072	118	39,7	0,0441	0,0402	0,0023	0,0271	0,0023	0,0250	0,0441	0,0402	0,0023	0,0271	0,0441	0,0402
108	119	74,8	0,0829	0,0756	0,0045	0,0510	0,0045	0,0472	0,0829	0,0756	0,0045	0,0510	0,0829	0,0756
119	120	204,4	0,2267	0,2068	0,0120	0,1394	0,0120	0,1288	0,2267	0,2068	0,0120	0,1394	0,2267	0,2068
120	121	112,6	0,1250	0,1138	0,0067	0,0768	0,0067	0,0709	0,1250	0,1138	0,0067	0,0768	0,1250	0,1138
121	122	20,2	0,0224	0,0204	0,0012	0,0138	0,0012	0,0127	0,0224	0,0204	0,0012	0,0138	0,0224	0,0204
097	123	132,3	0,0327	0,1176	0,0079	0,0902	0,0079	0,0834	0,0327	0,1176	0,0079	0,0902	0,0327	0,1176
123	124	123,3	0,0931	0,1241	0,0072	0,0841	0,0072	0,0776	0,0931	0,1241	0,0072	0,0841	0,0931	0,1241
124	125	109,3	0,1213	0,1106	0,0064	0,0746	0,0064	0,0689	0,1213	0,1106	0,0064	0,0746	0,1213	0,1106
125	126	98,0	0,1087	0,0992	0,0058	0,0668	0,0058	0,0617	0,1087	0,0992	0,0058	0,0668	0,1087	0,0992
098	127	45,5	0,0505	0,0461	0,0027	0,0310	0,0027	0,0286	0,0505	0,0461	0,0027	0,0310	0,0505	0,0461
127	128	293,9	0,3261	0,2972	0,0173	0,2006	0,0173	0,1852	0,3261	0,2972	0,0173	0,2006	0,3261	0,2972
128	129	18,5	0,0205	0,0187	0,0011	0,0126	0,0011	0,0117	0,0205	0,0187	0,0011	0,0126	0,0205	0,0187
129	130	331,0	0,3671	0,3349	0,0196	0,2258	0,0196	0,2087	0,3671	0,3349	0,0196	0,2258	0,3671	0,3349
111	131	122,8	0,1362	0,1242	0,0073	0,0838	0,0073	0,0775	0,1362	0,1242	0,0073	0,0838	0,1362	0,1242
095	132	67,9	0,0513	0,0684	0,0040	0,0464	0,0040	0,0428	0,0513	0,0684	0,0040	0,0464	0,0513	0,0684
132	133	107,7	0,1096	0,1088	0,0063	0,0734	0,0063	0,0678	0,1096	0,1088	0,0063	0,0734	0,1096	0,1088
133	134	23,1	0,0256	0,0234	0,0014	0,0158	0,0014	0,0146	0,0256	0,0234	0,0014	0,0158	0,0256	0,0234
133	135	17,7	0,0196	0,0179	0,0010	0,0121	0,0010	0,0112	0,0196	0,0179	0,0010	0,0121	0,0196	0,0179
133	136	47,8	0,0531	0,0483	0,0029	0,0326	0,0029	0,0302	0,0531	0,0483	0,0029	0,0326	0,0531	0,0483
136	137	23,1	0,0256	0,0234	0,0014	0,0158	0,0014	0,0146	0,0256	0,0234	0,0014	0,0158	0,0256	0,0234
136	138	15,8	0,0175	0,0160	0,0009	0,0108	0,0009	0,0100	0,0175	0,0160	0,0009	0,0108	0,0175	0,0160
136	139	43,1	0,0478	0,0436	0,0026	0,0294	0,0026	0,0272	0,0478	0,0436	0,0026	0,0294	0,0478	0,0436
139	140	87,2	0,0968	0,0882	0,0051	0,0594	0,0051	0,0549	0,0968	0,0882	0,0051	0,0594	0,0968	0,0882
139	141	45,9	0,0509	0,0464	0,0027	0,0313	0,0027	0,0289	0,0509	0,0464	0,0027	0,0313	0,0509	0,0464
141	142	87,3	0,0968	0,0883	0,0052	0,0595	0,0052	0,0550	0,0968	0,0883	0,0052	0,0595	0,0968	0,0883
141	143	128,4	0,1425	0,1298	0,0075	0,0875	0,0075	0,0809	0,1425	0,1298	0,0075	0,0875	0,1425	0,1298
141	144	43,0	0,0477	0,0435	0,0026	0,0293	0,0026	0,0271	0,0477	0,0435	0,0026	0,0293	0,0477	0,0435
144	145	23,7	0,0263	0,0240	0,0014	0,0162	0,0014	0,0149	0,0263	0,0240	0,0014	0,0162	0,0263	0,0240
145	146	84,6	0,0939	0,0855	0,0050	0,0577	0,0050	0,0533	0,0939	0,0855	0,0050	0,0577	0,0939	0,0855
089	147	131,1	0,0990	0,1319	0,0078	0,0894	0,0078	0,0826	0,0990	0,1319	0,0078	0,0894	0,0990	0,1319
147	148	16,6	0,0125	0,0167	0,0010	0,0113	0,0010	0,0105	0,0125	0,0167	0,0010	0,0113	0,0125	0,0167
148	149	62,5	0,0472	0,0629	0,0037	0,0426	0,0037	0,0394	0,0472	0,0629	0,0037	0,0426	0,0472	0,0629
089	150	158,4	0,1645	0,1601	0,0095	0,1080	0,0095	0,0999	0,1645	0,1601	0,0095	0,1080	0,1645	0,1601
150	151	15,0	0,0166	0,0152	0,0009	0,0102	0,0009	0,0094	0,0166	0,0152	0,0009	0,0102	0,0166	0,0152
151	152	18,9	0,0210	0,0191	0,0011	0,0129	0,0011	0,0119	0,0210	0,0191	0,0011	0,0129	0,0210	0,0191
151	153	15,1	0,0168	0,0153	0,0009	0,0103	0,0009	0,0095	0,0168	0,0153	0,0009	0,0103	0,0168	0,0153
151	154	64,2	0,0712	0,0650	0,0038	0,0438	0,0038	0,0405	0,0712	0,0650	0,0038	0,0438	0,0712	0,0650
154	155	20,6	0,0229	0,0208	0,0012	0,0141	0,0012	0,0130	0,0229	0,0208	0,0012	0,0141	0,0229	0,0208
154	156	12,8	0,0142	0,0129	0,0008	0,0087	0,0008	0,0081	0,0142	0,0129	0,0008	0,0087	0,0142	0,0129
014	157	95,7	0,0236	0,0852	0,0057	0,0624	0,0057	0,0587	0,0236	0,0852	0,0057	0,0653	0,0236	0,0852
017	158	203,9	0,2262	0,2062	0,0121	0,1392	0,0121	0,1284	0,2262	0,2062	0,0121	0,1392	0,2262	0,2062
158	159	82,5	0,0915	0,0834	0,0048	0,0563	0,0048	0,0520	0,0915	0,0834	0,0048	0,0563	0,0915	0,0834
159	160	149,2	0,1655	0,1510	0,0089	0,1018	0,0089	0,0941	0,1655	0,1510	0,0089	0,1018	0,1655	0,1510
160	161	59,9	0,0664	0,0606	0,0036	0,0409	0,0036	0,0377	0,0664	0,0606	0,0036	0,0409	0,0664	0,0606
161	162	47,7	0,0529	0,0483	0,0029	0,0325	0,0029	0,0301	0,0529	0,0483	0,0029	0,0325	0,0529	0,0483
162	163	292,5	0,3246	0,2960	0,0173	0,1969	0,0173	0,1829	0,3246	0,2960	0,0173	0,1995	0,3246	0,2960
163	164	313,9	0,3483	0,3175	0,0186	0,2142	0,0186	0,1977	0,3483	0,3175	0,0186	0,2142	0,3483	0,3175
158	165	73,6	0,0816	0,0745	0,0044	0,0502	0,0044	0,0463	0,0816	0,0745	0,0044	0,0502	0,0816	0,0745
165	166	40,5	0,0450	0,0410	0,0024	0,0276	0,0024	0,0255	0,0450	0,0410	0,0024	0,0276	0,0450	0,0410
166	167	105,7	0,1173	0,1069	0,0063	0,0721	0,0063	0,0666	0,1173	0,1069	0,0063	0,0721	0,1173	0,1069
124	168	53,7	0,0596	0,0543	0,0032	0,0367	0,0032	0,0338	0,0596	0,0543	0,0032	0,0367	0,0596	0,0543
168	169	26,0	0,0288	0,0263	0,0015	0,0177	0,0015	0,0164	0,0288	0,0263	0,0015	0,0177	0,0288	0,0263
169	170	180,2	0,1999	0,1822	0,0107	0,1230	0,0107	0,1135	0,1999	0,1822	0,0107	0,1230	0,1999	0,1822

020	171	65,0	0,0721	0,0658	0,0039	0,0444	0,0039	0,0410	0,0721	0,0658	0,0039	0,0444	0,0721	0,0658
160	172	35,2	0,0391	0,0356	0,0021	0,0240	0,0021	0,0222	0,0391	0,0356	0,0021	0,0240	0,0391	0,0356
023	173	49,4	0,0333	0,0466	0,0029	0,0337	0,0029	0,0311	0,0333	0,0466	0,0029	0,0337	0,0333	0,0466
173	174	36,0	0,0399	0,0364	0,0021	0,0246	0,0021	0,0227	0,0399	0,0364	0,0021	0,0246	0,0399	0,0364
024	175	51,2	0,0568	0,0518	0,0030	0,0350	0,0030	0,0322	0,0568	0,0518	0,0030	0,0350	0,0568	0,0518
013	176	14,1	0,0156	0,0143	0,0008	0,0092	0,0008	0,0086	0,0156	0,0143	0,0008	0,0096	0,0156	0,0143
035	177	61,8	0,0686	0,0626	0,0036	0,0403	0,0036	0,0379	0,0686	0,0626	0,0036	0,0421	0,0686	0,0626
061	178	81,9	0,0612	0,0824	0,0049	0,0559	0,0049	0,0516	0,0612	0,0824	0,0049	0,0559	0,0612	0,0824
178	179	91,8	0,0693	0,0924	0,0054	0,0626	0,0054	0,0578	0,0693	0,0924	0,0054	0,0626	0,0693	0,0924
179	180	85,9	0,0649	0,0865	0,0051	0,0586	0,0051	0,0541	0,0649	0,0865	0,0051	0,0586	0,0649	0,0865
180	181	625,2	0,4722	0,6294	0,0372	0,4266	0,0372	0,3937	0,4722	0,6294	0,0372	0,4266	0,4722	0,6294
181	182	171,8	0,1297	0,1730	0,0102	0,1172	0,0102	0,1082	0,1297	0,1730	0,0102	0,1172	0,1297	0,1730
182	183	303,9	0,2296	0,3060	0,0180	0,2073	0,0180	0,1914	0,2296	0,3060	0,0180	0,2073	0,2296	0,3060
183	184	348,8	0,2634	0,3512	0,0206	0,2380	0,0206	0,2197	0,2634	0,3512	0,0206	0,2380	0,2634	0,3512
184	185	198,7	0,1501	0,2001	0,0118	0,1355	0,0118	0,1251	0,1501	0,2001	0,0118	0,1355	0,1501	0,2001
185	186	26,3	0,0436	0,0265	0,0016	0,0179	0,0016	0,0166	0,0436	0,0265	0,0016	0,0179	0,0436	0,0265
186	187	93,0	0,0702	0,0936	0,0055	0,0634	0,0055	0,0586	0,0702	0,0936	0,0055	0,0634	0,0702	0,0936
187	188	166,9	0,1027	0,1663	0,0099	0,1139	0,0099	0,1051	0,1027	0,1663	0,0099	0,1139	0,1027	0,1663
188	189	85,7	0,0527	0,0854	0,0051	0,0610	0,0051	0,0551	0,0527	0,0854	0,0051	0,0585	0,0527	0,0854
189	190	28,7	0,0318	0,0290	0,0017	0,0196	0,0017	0,0181	0,0318	0,0290	0,0017	0,0196	0,0318	0,0290
190	191	41,1	0,0456	0,0416	0,0024	0,0280	0,0024	0,0259	0,0456	0,0416	0,0024	0,0280	0,0456	0,0416
191	192	26,2	0,0291	0,0265	0,0016	0,0179	0,0016	0,0165	0,0291	0,0265	0,0016	0,0179	0,0291	0,0265
189	193	143,9	0,0885	0,1435	0,0085	0,0962	0,0085	0,0896	0,0885	0,1435	0,0085	0,0982	0,0885	0,1435
193	194	43,7	0,0269	0,0436	0,0026	0,0285	0,0026	0,0268	0,0269	0,0436	0,0026	0,0298	0,0269	0,0436
194	195	44,8	0,0497	0,0453	0,0027	0,0305	0,0027	0,0283	0,0497	0,0453	0,0027	0,0305	0,0497	0,0453
195	196	155,4	0,1598	0,1502	0,0093	0,1060	0,0093	0,0980	0,1598	0,1502	0,0093	0,1060	0,1598	0,1502
196	197	364,8	0,3672	0,3482	0,0215	0,2399	0,0215	0,2249	0,3672	0,3482	0,0215	0,2489	0,3672	0,3482
194	198	164,1	0,1009	0,1635	0,0097	0,1110	0,0097	0,1029	0,1009	0,1635	0,0097	0,1119	0,1009	0,1635
198	199	42,9	0,0476	0,0434	0,0025	0,0293	0,0025	0,0270	0,0476	0,0434	0,0025	0,0293	0,0476	0,0434
199	200	160,6	0,1407	0,1581	0,0094	0,1084	0,0094	0,1007	0,1407	0,1581	0,0094	0,1095	0,1407	0,1581
200	201	38,2	0,0424	0,0386	0,0023	0,0261	0,0023	0,0241	0,0424	0,0386	0,0023	0,0261	0,0424	0,0386
201	202	98,0	0,1087	0,0992	0,0058	0,0662	0,0058	0,0613	0,1087	0,0992	0,0058	0,0669	0,1087	0,0992
103	203	74,5	1,4624	0,0699	0,0044	0,0508	0,0044	0,0469	1,4624	0,0699	0,0044	0,0508	1,4624	0,0699
043	204	24,2	0,0401	0,0244	0,0014	0,0178	0,0014	0,0158	0,0401	0,0244	0,0014	0,0165	0,0401	0,0244
204	205	641,8	1,0631	0,6467	0,0381	0,4464	0,0381	0,4238	1,0631	0,6467	0,0381	0,4016	1,0631	0,6467
205	206	551,0	0,9126	0,5553	0,0327	0,3759	0,0327	0,3472	0,9126	0,5553	0,0327	0,3759	0,9126	0,5553
206	207	191,3	0,3168	0,1929	0,0114	0,1305	0,0114	0,1206	0,3168	0,1929	0,0114	0,1305	0,3168	0,1929
207	208	145,8	0,2415	0,1470	0,0086	0,0995	0,0086	0,0919	0,2415	0,1470	0,0086	0,0995	0,2415	0,1470
208	209	228,0	0,3777	0,2298	0,0135	0,1555	0,0135	0,1436	0,3777	0,2298	0,0135	0,1555	0,3777	0,2298
209	210	415,3	0,6879	0,4186	0,0246	0,2833	0,0246	0,2617	0,6879	0,4186	0,0246	0,2833	0,6879	0,4186
210	211	614,8	1,0184	0,6199	0,0363	0,4295	0,0363	0,3916	1,0184	0,6199	0,0363	0,4195	1,0184	0,6199
211	212	291,4	0,4826	0,2938	0,0172	0,1987	0,0172	0,1836	0,4826	0,2938	0,0172	0,1987	0,4826	0,2938
212	213	289,5	0,4795	0,2919	0,0172	0,2012	0,0172	0,1839	0,4795	0,2919	0,0172	0,1974	0,4795	0,2919
213	214	73,7	0,1221	0,0743	0,0043	0,0515	0,0043	0,0470	0,1221	0,0743	0,0043	0,0502	0,1221	0,0743
214	215	437,4	0,7246	0,4410	0,0259	0,3055	0,0259	0,3018	0,7246	0,4410	0,0259	0,2349	0,7246	0,4410
215	216	164,4	0,2723	0,1657	0,0098	0,1122	0,0098	0,1036	0,2723	0,1657	0,0098	0,1122	0,2723	0,1657
216	217	135,7	0,2248	0,1368	0,0080	0,0926	0,0080	0,0855	0,2248	0,1368	0,0080	0,0926	0,2248	0,1368
217	218	523,4	0,8671	0,5276	0,0311	0,3571	0,0311	0,3297	0,8671	0,5276	0,0311	0,3571	0,8671	0,5276
218	219	24,0	0,0398	0,0242	0,0014	0,0164	0,0014	0,0151	0,0398	0,0242	0,0014	0,0164	0,0398	0,0242
215	220	366,6	0,6071	0,3694	0,0217	0,2495	0,0217	0,1343	0,6071	0,3694	0,0217	0,2512	0,6071	0,3694
214	221	718,1	1,1895	0,7239	0,0425	0,4518	0,0425	0,2632	1,1895	0,7239	0,0425	0,2632	1,1895	0,7239
221	222	110,3	0,1827	0,1111	0,0066	0,0742	0,0066	0,0404	0,1827	0,1111	0,0066	0,0404	0,1827	0,1111
221	223	571,6	0,9468	0,5762	0,0338	0,3125	0,0338	0,2526	0,9468	0,5762	0,0338	0,2094	0,9468	0,5762
092	224	145,7	0,1616	0,1473	0,0087	0,0994	0,0087	0,0918	0,1616	0,1473	0,0087	0,0994	0,1616	0,1473
144	225	169,4	0,1880	0,1713	0,0100	0,1155	0,0100	0,1067	0,1880	0,1713	0,0100	0,1155	0,1880	0,1713
225	226	115,8	0,1285	0,1171	0,0068	0,0781	0,0068	0,0725	0,1285	0,1171	0,0068	0,0790	0,1285	0,1171
226	227	132,6	0,1471	0,1341	0,0080	0,0905	0,0080	0,0835	0,1471	0,1341	0,0080	0,0905	0,1471	0,1341
227	228	46,7	0,0518	0,0472	0,0028	0,0318	0,0028	0,0295	0,0518	0,0472	0,0028	0,0318	0,0518	0,0472
228	229	64,3	0,0713	0,0651	0,0038	0,0439	0,0038	0,0405	0,0713	0,0651	0,0038	0,0439	0,0713	0,0651
229	230	67,9	0,0754	0,0687	0,0040	0,0463	0,0040	0,0428	0,0754	0,0687	0,0040	0,0463	0,0754	0,0687
230	231	49,3	0,0547	0,0499	0,0029	0,0336	0,0029	0,0311	0,0547	0,0499	0,0029	0,0336	0,0547	0,0499
231	232	89,5	0,0992	0,0905	0,0053	0,0611	0,0053	0,0564	0,0992	0,0905	0,0053	0,0611	0,0992	0,0905
198	233	343,4	0,3243	0,3457	0,0203	0,2251	0,0203	0,2112	0,3243	0,3457	0,0203	0,2343	0,3243	0,3457
233	234	372,9	2,8194	0,3675	0,0223	0,2646	0,0223	0,2067	2,8194	0,3675	0,0223	0,2156	2,8194	0,3675

193	235	69,9	0,0776	0,0707	0,0041	0,0455	0,0041	0,0429	0,0776	0,0707	0,0041	0,0477	0,0776	0,0707
190	236	128,7	0,1428	0,1302	0,0076	0,0878	0,0076	0,0811	0,1428	0,1302	0,0076	0,0878	0,1428	0,1302
191	237	243,5	0,2701	0,2464	0,0145	0,1661	0,0145	0,1534	0,2701	0,2464	0,0145	0,1661	0,2701	0,2464
237	238	266,2	0,2953	0,2694	0,0158	0,1745	0,0158	0,1637	0,2953	0,2694	0,0158	0,1816	0,2953	0,2694
200	239	311,7	0,1918	0,3106	0,0185	0,2261	0,0185	0,2019	0,1918	0,3106	0,0185	0,2126	0,1918	0,3106
239	240	117,5	0,0723	0,1171	0,0070	0,0802	0,0070	0,0740	0,0723	0,1171	0,0070	0,0802	0,0723	0,1171
240	241	158,0	0,0972	0,1574	0,0094	0,1078	0,0094	0,0996	0,0972	0,1574	0,0094	0,1078	0,0972	0,1574
241	242	151,6	0,0932	0,1510	0,0090	0,1073	0,0090	0,0844	0,0932	0,1510	0,0090	0,0882	0,0932	0,1510
242	243	26,8	0,0165	0,0267	0,0016	0,0183	0,0016	0,0169	0,0165	0,0267	0,0016	0,0183	0,0165	0,0267
243	244	94,5	0,0582	0,0942	0,0057	0,0688	0,0057	0,0473	0,0582	0,0942	0,0057	0,0477	0,0582	0,0942
244	245	148,7	0,0915	0,1482	0,0088	0,1057	0,0088	0,0819	0,0915	0,1482	0,0088	0,0853	0,0915	0,1482
245	246	38,3	0,0236	0,0381	0,0022	0,0262	0,0022	0,0242	0,0236	0,0381	0,0022	0,0262	0,0236	0,0381
246	247	45,4	0,0279	0,0452	0,0027	0,0310	0,0027	0,0286	0,0279	0,0452	0,0027	0,0310	0,0279	0,0452
247	248	118,4	0,0729	0,1180	0,0070	0,0808	0,0070	0,0746	0,0729	0,1180	0,0070	0,0808	0,0729	0,1180
248	249	688,3	0,4236	0,6857	0,0407	0,4748	0,0407	0,4357	0,4236	0,6857	0,0407	0,4697	0,4236	0,6857
249	250	484,0	0,2978	0,4821	0,0286	0,3302	0,0286	0,3050	0,2978	0,4821	0,0286	0,3302	0,2978	0,4821
250	251	209,6	0,1290	0,2088	0,0124	0,1430	0,0124	0,1321	0,1290	0,2088	0,0124	0,1430	0,1290	0,2088
251	252	99,7	0,0614	0,0993	0,0059	0,0680	0,0059	0,0628	0,0614	0,0993	0,0059	0,0680	0,0614	0,0993
252	253	578,6	0,9585	0,5833	0,0342	0,4004	0,0342	0,3754	0,9585	0,5833	0,0342	0,3754	0,9585	0,5833
253	254	189,3	0,3136	0,1908	0,0112	0,1330	0,0112	0,1208	0,3136	0,1908	0,0112	0,1291	0,3136	0,1908
254	255	189,8	0,3144	0,1913	0,0113	0,1295	0,0113	0,1196	0,3144	0,1913	0,0113	0,1295	0,3144	0,1913
255	256	186,9	0,3096	0,1884	0,0111	0,1320	0,0111	0,1196	0,3096	0,1884	0,0111	0,1275	0,3096	0,1884
256	257	103,0	0,1706	0,1038	0,0061	0,0757	0,0061	0,0671	0,1706	0,1038	0,0061	0,0703	0,1706	0,1038
257	258	615,7	1,0199	0,6206	0,0366	0,4304	0,0366	0,3923	1,0199	0,6206	0,0366	0,4201	1,0199	0,6206
258	259	138,0	0,2286	0,1391	0,0082	0,0941	0,0082	0,0869	0,2286	0,1391	0,0082	0,0941	0,2286	0,1391
259	260	125,0	0,2071	0,1260	0,0074	0,0852	0,0074	0,0788	0,2071	0,1260	0,0074	0,0852	0,2071	0,1260
260	261	190,1	0,3149	0,1916	0,0112	0,1296	0,0112	0,1197	0,3149	0,1916	0,0112	0,1296	0,3149	0,1916
261	262	121,4	0,2011	0,1224	0,0072	0,0828	0,0072	0,0765	0,2011	0,1224	0,0072	0,0828	0,2011	0,1224
262	263	99,6	0,1650	0,1004	0,0059	0,0680	0,0059	0,0627	0,1650	0,1004	0,0059	0,0680	0,1650	0,1004
263	264	705,5	1,1686	0,7111	0,0418	0,4911	0,0418	0,4667	1,1686	0,7111	0,0418	0,4398	1,1686	0,7111
264	265	316,4	0,5240	0,3188	0,0188	0,2201	0,0188	0,2010	0,5240	0,3188	0,0188	0,2159	0,5240	0,3188
265	266	420,2	0,6960	0,4234	0,0248	0,2956	0,0248	0,2684	0,6960	0,4234	0,0248	0,2867	0,6960	0,4234
266	267	18,9	0,0313	0,0191	0,0011	0,0129	0,0011	0,0119	0,0313	0,0191	0,0011	0,0129	0,0313	0,0191
267	268	166,1	0,2751	0,1675	0,0098	0,1133	0,0098	0,1046	0,2751	0,1675	0,0098	0,1133	0,2751	0,1675
268	269	195,0	0,3230	0,1966	0,0115	0,1330	0,0115	0,1229	0,3230	0,1966	0,0115	0,1330	0,3230	0,1966
269	270	15,1	0,0250	0,0152	0,0009	0,0111	0,0009	0,0055	0,0250	0,0152	0,0009	0,0055	0,0250	0,0152
269	271	351,4	0,5820	0,3541	0,0208	0,2397	0,0208	0,2213	0,5820	0,3541	0,0208	0,2397	0,5820	0,3541
271	272	126,6	0,2097	0,1276	0,0075	0,0920	0,0075	0,0820	0,2097	0,1276	0,0075	0,0864	0,2097	0,1276
272	273	362,6	0,6006	0,3655	0,0214	0,2594	0,0214	0,2469	0,6006	0,3655	0,0214	0,2168	0,6006	0,3655
272	274	278,9	0,4620	0,2811	0,0165	0,1951	0,0165	0,1776	0,4620	0,2811	0,0165	0,1903	0,4620	0,2811
274	275	254,1	0,4209	0,2561	0,0151	0,1786	0,0151	0,1624	0,4209	0,2561	0,0151	0,1733	0,4209	0,2561
274	276	52,0	0,0861	0,0524	0,0031	0,0382	0,0031	0,0339	0,0861	0,0524	0,0031	0,0355	0,0861	0,0524
271	277	96,8	0,1604	0,0976	0,0057	0,0700	0,0057	0,0626	0,1604	0,0976	0,0057	0,0661	0,1604	0,0976
265	278	77,3	0,1280	0,0779	0,0046	0,0528	0,0046	0,0487	0,1280	0,0779	0,0046	0,0528	0,1280	0,0779
262	279	37,0	0,0613	0,0373	0,0022	0,0252	0,0022	0,0233	0,0613	0,0373	0,0022	0,0252	0,0613	0,0373
261	280	403,7	0,6687	0,4070	0,0239	0,2754	0,0239	0,2544	0,6687	0,4070	0,0239	0,2754	0,6687	0,4070
260	281	83,8	0,1388	0,0845	0,0050	0,0572	0,0050	0,0528	0,1388	0,0845	0,0050	0,0572	0,1388	0,0845
247	282	333,2	0,5519	0,3360	0,0196	0,2344	0,0196	0,2129	0,5519	0,3360	0,0196	0,2273	0,5519	0,3360
282	283	72,0	0,1193	0,0726	0,0043	0,0491	0,0043	0,0454	0,1193	0,0726	0,0043	0,0491	0,1193	0,0726
283	284	90,5	0,1499	0,0912	0,0054	0,0617	0,0054	0,0570	0,1499	0,0912	0,0054	0,0617	0,1499	0,0912
284	285	114,1	0,1890	0,1150	0,0068	0,0778	0,0068	0,0719	0,1890	0,1150	0,0068	0,0778	0,1890	0,1150
285	286	217,5	0,3603	0,2192	0,0129	0,1483	0,0129	0,1371	0,3603	0,2192	0,0129	0,1483	0,3603	0,2192
286	287	97,7	0,1618	0,0985	0,0058	0,0667	0,0058	0,0615	0,1618	0,0985	0,0058	0,0667	0,1618	0,0985
287	288	86,3	0,1429	0,0870	0,0051	0,0589	0,0051	0,0544	0,1429	0,0870	0,0051	0,0589	0,1429	0,0870
288	289	124,3	0,2059	0,1253	0,0074	0,0853	0,0074	0,0785	0,2059	0,1253	0,0074	0,0848	0,2059	0,1253
289	290	274,3	0,4543	0,2765	0,0163	0,1943	0,0163	0,1758	0,4543	0,2765	0,0163	0,1871	0,4543	0,2765
290	291	40,5	0,0671	0,0408	0,0024	0,0297	0,0024	0,0264	0,0671	0,0408	0,0024	0,0276	0,0671	0,0408
291	292	87,9	0,1456	0,0886	0,0052	0,0646	0,0052	0,0573	0,1456	0,0886	0,0052	0,0600	0,1456	0,0886
292	293	258,5	0,4282	0,2606	0,0153	0,1808	0,0153	0,1647	0,4282	0,2606	0,0153	0,1764	0,4282	0,2606
293	294	402,9	0,6674	0,4061	0,0238	0,2749	0,0238	0,2539	0,6674	0,4061	0,0238	0,2749	0,6674	0,4061
294	295	432,8	0,7170	0,4363	0,0256	0,2953	0,0256	0,2727	0,7170	0,4363	0,0256	0,2953	0,7170	0,4363
295	296	213,2	0,3531	0,2149	0,0126	0,1454	0,0126	0,1036	0,3531	0,2149	0,0126	0,1087	0,3531	0,2149
296	297	164,9	0,2732	0,1662	0,0098	0,1125	0,0098	0,1039	0,2732	0,1662	0,0098	0,1125	0,2732	0,1662
297	298	38,3	0,0634	0,0386	0,0023	0,0281	0,0023	0,0250	0,0634	0,0386	0,0023	0,0261	0,0634	0,0386

297	299	145,8	0,2415	0,1470	0,0086	0,0995	0,0086	0,0919	0,2415	0,1470	0,0086	0,0995	0,2415	0,1470
299	300	404,1	0,6694	0,4073	0,0240	0,2811	0,0240	0,2567	0,6694	0,4073	0,0240	0,2757	0,6694	0,4073
300	301	29,5	0,0488	0,0298	0,0018	0,0205	0,0018	0,0188	0,0488	0,0298	0,0018	0,0201	0,0488	0,0298
299	302	123,9	0,2052	0,1249	0,0073	0,0845	0,0073	0,0781	0,2052	0,1249	0,0073	0,0845	0,2052	0,1249
302	303	28,6	0,0474	0,0288	0,0017	0,0195	0,0017	0,0105	0,0474	0,0288	0,0017	0,0105	0,0017	0,0125
302	304	669,6	1,1092	0,6750	0,0396	0,4568	0,0396	0,4219	1,1092	0,6750	0,0396	0,4568	1,1092	0,6750
304	305	238,2	0,3946	0,2401	0,0141	0,1683	0,0141	0,1525	0,3946	0,2401	0,0141	0,1625	0,3946	0,2401
305	306	98,6	0,1633	0,0994	0,0058	0,0673	0,0058	0,0621	0,1633	0,0994	0,0058	0,0673	0,1633	0,0994
305	307	107,2	0,1776	0,1081	0,0063	0,0731	0,0063	0,0675	0,1776	0,1081	0,0063	0,0731	0,1776	0,1081
307	308	200,5	0,3321	0,2020	0,0118	0,1368	0,0118	0,1263	0,3321	0,2020	0,0118	0,1368	0,3321	0,2020
307	309	80,0	0,1325	0,0806	0,0047	0,0546	0,0047	0,0504	0,1325	0,0806	0,0047	0,0546	0,1325	0,0806
309	310	661,7	1,0961	0,6670	0,0391	0,4581	0,0391	0,4196	1,0961	0,6670	0,0391	0,4513	1,0961	0,6670
310	311	285,8	0,4734	0,2880	0,0170	0,1950	0,0170	0,1801	0,4734	0,2880	0,0170	0,1950	0,4734	0,2880
309	312	91,5	0,1516	0,0922	0,0054	0,0624	0,0054	0,0576	0,1516	0,0922	0,0054	0,0624	0,1516	0,0922
312	313	58,9	0,0976	0,0594	0,0035	0,0402	0,0035	0,0371	0,0976	0,0594	0,0035	0,0402	0,0976	0,0594
312	314	616,5	1,0211	0,6214	0,0365	0,4255	0,0365	0,3904	1,0211	0,6214	0,0365	0,4205	1,0211	0,6214
314	315	87,4	0,1448	0,0881	0,0052	0,0596	0,0052	0,0551	0,1448	0,0881	0,0052	0,0596	0,1448	0,0881
315	316	485,8	0,8046	0,4896	0,0287	0,3363	0,0287	0,3170	0,8046	0,4896	0,0287	0,3112	0,8046	0,4896
316	317	117,6	0,1948	0,1185	0,0070	0,0802	0,0070	0,0741	0,1948	0,1185	0,0070	0,0802	0,1948	0,1185
317	318	570,7	0,9453	0,5754	0,0339	0,3894	0,0339	0,3594	0,9453	0,5754	0,0339	0,3894	0,9453	0,5754
316	319	544,1	0,9012	0,5483	0,0321	0,3711	0,0321	0,3427	0,9012	0,5483	0,0321	0,3711	0,9012	0,5483
319	320	523,4	0,8670	0,5274	0,0310	0,3743	0,0310	0,1918	0,8670	0,5274	0,0310	0,3705	0,0310	0,2288
319	321	38,5	0,0638	0,0388	0,0023	0,0262	0,0023	0,0243	0,0638	0,0388	0,0023	0,0262	0,0638	0,0388
317	322	17,1	0,0283	0,0172	0,0010	0,0117	0,0010	0,0108	0,0283	0,0172	0,0010	0,0117	0,0283	0,0172
315	323	604,7	1,0017	0,6095	0,0360	0,4124	0,0360	0,3810	1,0017	0,6095	0,0360	0,4124	1,0017	0,6095
323	324	168,1	0,2785	0,1694	0,0100	0,1178	0,0100	0,1130	0,2785	0,1694	0,0100	0,1016	0,2785	0,1694
183	325	108,9	0,1804	0,1097	0,0065	0,0800	0,0065	0,0710	0,1804	0,1097	0,0065	0,0743	0,1804	0,1097
325	326	10,9	0,0181	0,0110	0,0006	0,0074	0,0006	0,0069	0,0181	0,0110	0,0006	0,0074	0,0181	0,0110
326	327	279,6	0,4631	0,2819	0,0166	0,1908	0,0166	0,1762	0,4631	0,2819	0,0166	0,1908	0,4631	0,2819
327	328	321,9	0,5332	0,3244	0,0191	0,2197	0,0191	0,2028	0,5332	0,3244	0,0191	0,2197	0,5332	0,3244
328	329	206,4	0,3418	0,2080	0,0122	0,1408	0,0122	0,1300	0,3418	0,2080	0,0122	0,1408	0,3418	0,2080
329	330	369,2	0,6114	0,3721	0,0219	0,2599	0,0219	0,2359	0,6114	0,3721	0,0219	0,2520	0,6114	0,3721
330	331	74,0	0,1226	0,0746	0,0044	0,0544	0,0044	0,0482	0,1226	0,0746	0,0044	0,0505	0,1226	0,0746
331	332	108,9	0,1804	0,1098	0,0064	0,0743	0,0064	0,0686	0,1804	0,1098	0,0064	0,0743	0,1804	0,1098
332	333	213,2	0,3531	0,2148	0,0126	0,1455	0,0126	0,1343	0,3531	0,2148	0,0126	0,1455	0,3531	0,2148
333	334	103,8	0,1719	0,1046	0,0061	0,0708	0,0061	0,0654	0,1719	0,1046	0,0061	0,0708	0,1719	0,1046
334	335	133,1	0,2205	0,1342	0,0079	0,0908	0,0079	0,0839	0,2205	0,1342	0,0079	0,0908	0,2205	0,1342
335	336	232,3	0,3848	0,2341	0,0138	0,1585	0,0138	0,1464	0,3848	0,2341	0,0138	0,1585	0,3848	0,2341
336	337	165,5	0,2742	0,1669	0,0098	0,1172	0,0098	0,1061	0,2742	0,1669	0,0098	0,1129	0,2742	0,1669
337	338	187,0	0,3097	0,1885	0,0111	0,1275	0,0111	0,1178	0,3097	0,1885	0,0111	0,1275	0,3097	0,1885
338	339	213,3	0,3533	0,2150	0,0127	0,1455	0,0127	0,1344	0,3533	0,2150	0,0127	0,1455	0,3533	0,2150
339	340	74,4	0,1232	0,0750	0,0044	0,0508	0,0044	0,0469	0,1232	0,0750	0,0044	0,0508	0,1232	0,0750
340	341	389,4	0,6450	0,3926	0,0231	0,2719	0,0231	0,2480	0,6450	0,3926	0,0231	0,2656	0,6450	0,3926
341	342	202,2	0,3349	0,2038	0,0120	0,1432	0,0120	0,1296	0,3349	0,2038	0,0120	0,1379	0,3349	0,2038
342	343	14,5	0,0240	0,0146	0,0009	0,0099	0,0009	0,0091	0,0240	0,0146	0,0009	0,0099	0,0240	0,0146
341	344	316,3	0,5240	0,3189	0,0188	0,2168	0,0188	0,2015	0,5240	0,3189	0,0188	0,2116	0,5240	0,3189
344	345	619,9	1,0268	0,6248	0,0366	0,4283	0,0366	0,3926	1,0268	0,6248	0,0366	0,4229	1,0268	0,6248
345	346	123,5	0,2045	0,1245	0,0074	0,0871	0,0074	0,0790	0,2045	0,1245	0,0074	0,0843	0,2045	0,1245
345	347	224,8	0,3724	0,2266	0,0133	0,1533	0,0133	0,1416	0,3724	0,2266	0,0133	0,1533	0,3724	0,2266
347	348	662,9	1,0980	0,6683	0,0391	0,4523	0,0391	0,4176	1,0980	0,6683	0,0391	0,4523	1,0980	0,6683
348	349	221,0	0,3660	0,2228	0,0130	0,1508	0,0130	0,1392	0,3660	0,2228	0,0130	0,1508	0,3660	0,2228
349	350	461,1	0,7639	0,4646	0,0274	0,3194	0,0274	0,2925	0,7639	0,4646	0,0274	0,3145	0,7639	0,4646
350	351	509,4	0,8438	0,5134	0,0300	0,3474	0,0300	0,3210	0,8438	0,5134	0,0300	0,3474	0,8438	0,5134
350	352	80,9	0,1340	0,0815	0,0048	0,0552	0,0048	0,0510	0,1340	0,0815	0,0048	0,0552	0,1340	0,0815
352	353	589,1	0,9758	0,5939	0,0347	0,4059	0,0347	0,3730	0,9758	0,5939	0,0347	0,4017	0,9758	0,5939
352	354	77,3	0,1280	0,0779	0,0046	0,0527	0,0046	0,0487	0,1280	0,0779	0,0046	0,0527	0,1280	0,0779
349	355	42,7	0,0707	0,0430	0,0025	0,0314	0,0025	0,0278	0,0707	0,0430	0,0025	0,0291	0,0707	0,0430
347	356	636,1	1,0536	0,6411	0,0377	0,4341	0,0377	0,4006	1,0536	0,6411	0,0377	0,4341	1,0536	0,6411
356	357	305,7	0,5064	0,3081	0,0181	0,2086	0,0181	0,1926	0,5064	0,3081	0,0181	0,2086	0,5064	0,3081
357	358	107,9	0,1787	0,1087	0,0064	0,0736	0,0064	0,0680	0,1787	0,1087	0,0064	0,0736	0,1787	0,1087
358	359	694,9	1,1510	0,7005	0,0411	0,4741	0,0411	0,4378	1,1510	0,7005	0,0411	0,4741	1,1510	0,7005
359	360	591,6	0,9799	0,5963	0,0352	0,4037	0,0352	0,3727	0,9799	0,5963	0,0352	0,4037	0,9799	0,5963
344	361	92,4	0,1531	0,0931	0,0055	0,0679	0,0055	0,0602	0,1531	0,0931	0,0055	0,0630	0,1531	0,0931
341	362	29,1	0,0482	0,0293	0,0017	0,0199	0,0017	0,0183	0,0482	0,0293	0,0017	0,0199	0,0482	0,0293

339	363	55,9	0,0926	0,0563	0,0033	0,0381	0,0033	0,0352	0,0926	0,0563	0,0033	0,0381	0,0926	0,0563
338	364	73,6	0,1219	0,0742	0,0044	0,0502	0,0044	0,0464	0,1219	0,0742	0,0044	0,0502	0,1219	0,0742
337	365	362,6	0,6006	0,3654	0,0216	0,2473	0,0216	0,2284	0,6006	0,3654	0,0216	0,2473	0,6006	0,3654
336	366	16,3	0,0270	0,0164	0,0010	0,0111	0,0010	0,0103	0,0270	0,0164	0,0010	0,0111	0,0270	0,0164
252	367	116,2	0,0715	0,1158	0,0069	0,0793	0,0069	0,0732	0,0715	0,1158	0,0069	0,0793	0,0715	0,1158
367	368	570,8	0,3514	0,5688	0,0339	0,3954	0,0339	0,3620	0,3514	0,5688	0,0339	0,3895	0,3514	0,5688
368	369	229,9	0,1415	0,2291	0,0136	0,1569	0,0136	0,1448	0,1415	0,2291	0,0136	0,1569	0,1415	0,2291
369	370	11,4	0,0070	0,0114	0,0007	0,0078	0,0007	0,0072	0,0070	0,0114	0,0007	0,0078	0,0070	0,0114
370	371	671,3	0,4131	0,6689	0,0399	0,4580	0,0399	0,4230	0,4131	0,6689	0,0399	0,4580	0,4131	0,6689
371	372	108,3	0,0666	0,1079	0,0064	0,0739	0,0064	0,0682	0,0666	0,1079	0,0064	0,0739	0,0666	0,1079
372	373	50,2	0,0832	0,0506	0,0030	0,0342	0,0030	0,0316	0,0832	0,0506	0,0030	0,0342	0,0832	0,0506
372	374	120,5	0,1996	0,1215	0,0071	0,0822	0,0071	0,0759	0,1996	0,1215	0,0071	0,0822	0,1996	0,1215
374	375	75,1	0,1244	0,0757	0,0044	0,0512	0,0044	0,0473	0,1244	0,0757	0,0044	0,0512	0,1244	0,0757
201	376	527,4	0,5817	0,5314	0,0313	0,3529	0,0313	0,3285	0,5817	0,5314	0,0313	0,3599	0,5817	0,5314
376	377	291,7	0,3703	0,2949	0,0173	0,2006	0,0173	0,1840	0,3703	0,2949	0,0173	0,1989	0,3703	0,2949
377	378	788,7	1,3064	0,7949	0,0467	0,5504	0,0467	0,4265	1,3064	0,7949	0,0467	0,5504	1,3064	0,7949
378	379	76,4	0,1266	0,0770	0,0045	0,0553	0,0045	0,0302	0,1266	0,0770	0,0045	0,0553	0,1266	0,0770
379	380	348,6	0,5775	0,3514	0,0207	0,2377	0,0207	0,2197	0,5775	0,3514	0,0207	0,2377	0,5775	0,3514
380	381	32,3	0,0535	0,0326	0,0019	0,0220	0,0019	0,0203	0,0535	0,0326	0,0019	0,0220	0,0535	0,0326
381	382	7,8	0,0129	0,0078	0,0005	0,0053	0,0005	0,0049	0,0129	0,0078	0,0005	0,0053	0,0129	0,0078
381	383	29,5	0,0489	0,0297	0,0017	0,0201	0,0017	0,0186	0,0489	0,0297	0,0017	0,0201	0,0489	0,0297
383	384	32,1	0,0532	0,0324	0,0019	0,0219	0,0019	0,0202	0,0532	0,0324	0,0019	0,0219	0,0532	0,0324
383	385	332,2	0,5503	0,3349	0,0196	0,2278	0,0196	0,2118	0,5503	0,3349	0,0196	0,2219	0,5503	0,3349
379	386	187,1	0,3099	0,1886	0,0111	0,1326	0,0111	0,1199	0,3099	0,1886	0,0111	0,1277	0,3099	0,1886
378	387	257,9	0,4271	0,2600	0,0152	0,1800	0,0152	0,1717	0,4271	0,2600	0,0152	0,1587	0,4271	0,2600
377	388	342,6	0,5675	0,3453	0,0202	0,2338	0,0202	0,2158	0,5675	0,3453	0,0202	0,2338	0,5675	0,3453
331	389	343,4	0,5688	0,3461	0,0205	0,2417	0,0205	0,2194	0,5688	0,3461	0,0205	0,2342	0,5688	0,3461
328	390	201,3	0,2234	0,2036	0,0119	0,1324	0,0119	0,1242	0,2234	0,2036	0,0119	0,1373	0,2234	0,2036
390	391	35,7	0,0591	0,0360	0,0021	0,0244	0,0021	0,0225	0,0591	0,0360	0,0021	0,0244	0,0591	0,0360
390	392	40,0	0,0444	0,0405	0,0024	0,0261	0,0024	0,0245	0,0444	0,0405	0,0024	0,0273	0,0444	0,0405
328	393	185,3	0,2055	0,1875	0,0110	0,1207	0,0110	0,1136	0,2055	0,1875	0,0110	0,1264	0,2055	0,1875
393	394	145,9	0,1619	0,1474	0,0087	0,0983	0,0087	0,0911	0,1619	0,1474	0,0087	0,0995	0,1619	0,1474
394	395	22,4	0,0249	0,0227	0,0013	0,0146	0,0013	0,0137	0,0249	0,0227	0,0013	0,0153	0,0249	0,0227
394	396	39,0	0,0433	0,0394	0,0023	0,0254	0,0023	0,0239	0,0433	0,0394	0,0023	0,0266	0,0433	0,0394
396	397	299,0	0,3316	0,3026	0,0179	0,1959	0,0179	0,1840	0,3316	0,3026	0,0179	0,2040	0,3316	0,3026
397	398	32,8	0,0364	0,0332	0,0019	0,0214	0,0019	0,0201	0,0364	0,0332	0,0019	0,0224	0,0364	0,0332
397	399	342,2	0,3797	0,3461	0,0202	0,2432	0,0202	0,2196	0,3797	0,3461	0,0202	0,2335	0,3797	0,3461
399	400	102,8	0,1141	0,1040	0,0061	0,0701	0,0061	0,0648	0,1141	0,1040	0,0061	0,0701	0,1141	0,1040
393	401	172,0	0,1908	0,1740	0,0102	0,1122	0,0102	0,1054	0,1908	0,1740	0,0102	0,1174	0,1908	0,1740
401	402	240,0	0,2663	0,2429	0,0143	0,1564	0,0143	0,1472	0,2663	0,2429	0,0143	0,1639	0,2663	0,2429
357	403	654,6	1,0843	0,6599	0,0387	0,4532	0,0387	0,4151	1,0843	0,6599	0,0387	0,4465	1,0843	0,6599
403	404	540,3	0,8949	0,5447	0,0320	0,3689	0,0320	0,3410	0,8949	0,5447	0,0320	0,3676	0,8949	0,5447
404	405	22,1	0,0366	0,0223	0,0013	0,0151	0,0013	0,0139	0,0366	0,0223	0,0013	0,0151	0,0366	0,0223
404	406	432,0	0,7156	0,4355	0,0257	0,2947	0,0257	0,2721	0,7156	0,4355	0,0257	0,2947	0,7156	0,4355
268	407	574,9	0,9523	0,5795	0,0340	0,4035	0,0340	0,3877	0,9523	0,5795	0,0340	0,3445	0,9523	0,5795
407	408	72,9	0,1208	0,0735	0,0043	0,0497	0,0043	0,0459	0,1208	0,0735	0,0043	0,0497	0,1208	0,0735
408	409	615,0	1,0187	0,6198	0,0365	0,4218	0,0365	0,3884	1,0187	0,6198	0,0365	0,4196	1,0187	0,6198
407	410	118,9	0,1969	0,1198	0,0070	0,0854	0,0070	0,0767	0,1969	0,1198	0,0070	0,0811	0,1969	0,1198
408	411	441,8	0,7318	0,4454	0,0262	0,3014	0,0262	0,2783	0,7318	0,4454	0,0262	0,3014	0,7318	0,4454
267	412	716,1	1,1862	0,7218	0,0425	0,4884	0,0425	0,4512	1,1862	0,7218	0,0425	0,4884	1,1862	0,7218
412	413	761,6	1,2615	0,7677	0,0451	0,5324	0,0451	0,4946	1,2615	0,7677	0,0451	0,4983	1,2615	0,7677
413	414	355,8	0,5894	0,3587	0,0210	0,2545	0,0210	0,2291	0,5894	0,3587	0,0210	0,2428	0,5894	0,3587
263	415	290,8	0,4816	0,2930	0,0173	0,2059	0,0173	0,1863	0,4816	0,2930	0,0173	0,1984	0,4816	0,2930
415	416	141,9	0,2350	0,1430	0,0084	0,0969	0,0084	0,0894	0,2350	0,1430	0,0084	0,0969	0,2350	0,1430
415	417	158,6	0,2627	0,1599	0,0094	0,1082	0,0094	0,0999	0,2627	0,1599	0,0094	0,1082	0,2627	0,1599
254	418	138,2	0,2289	0,1393	0,0082	0,0983	0,0082	0,0888	0,2289	0,1393	0,0082	0,0943	0,2289	0,1393
367	419	615,0	1,0187	0,6199	0,0364	0,4207	0,0364	0,3877	1,0187	0,6199	0,0364	0,4196	1,0187	0,6199
419	420	309,9	0,5133	0,3123	0,0184	0,2114	0,0184	0,1953	0,5133	0,3123	0,0184	0,2114	0,5133	0,3123
368	421	20,2	0,0335	0,0204	0,0012	0,0148	0,0012	0,0132	0,0335	0,0204	0,0012	0,0138	0,0335	0,0204
370	422	536,5	0,8887	0,5407	0,0317	0,3692	0,0317	0,3394	0,8887	0,5407	0,0317	0,3660	0,8887	0,5407
422	423	109,9	0,1821	0,1107	0,0065	0,0773	0,0065	0,0702	0,1821	0,1107	0,0065	0,0750	0,1821	0,1107
422	424	316,4	0,5242	0,3188	0,0188	0,2159	0,0188	0,1994	0,5242	0,3188	0,0188	0,2159	0,5242	0,3188
212	425	20,8	0,0345	0,0210	0,0012	0,0142	0,0012	0,0131	0,0345	0,0210	0,0012	0,0142	0,0345	0,0210
214	426	41,2	0,0682	0,0415	0,0024	0,0281	0,0024	0,0260	0,0682	0,0415	0,0024	0,0281	0,0682	0,0415

214	427	452,7	0,7046	0,4564	0,0268	0,2944	0,0268	0,2751	0,7046	0,4564	0,0268	0,2944	0,7046	0,4564
044	428	147,5	0,2443	0,1487	0,0087	0,1044	0,0087	0,0945	0,2443	0,1487	0,0087	0,1006	0,2443	0,1487
045	429	76,8	0,1272	0,0774	0,0046	0,0564	0,0046	0,0501	0,1272	0,0774	0,0046	0,0524	0,1272	0,0774
046	430	302,8	0,5016	0,3053	0,0179	0,2103	0,0179	0,1923	0,5016	0,3053	0,0179	0,2066	0,5016	0,3053
430	431	146,0	0,2418	0,1472	0,0086	0,1020	0,0086	0,0930	0,2418	0,1472	0,0086	0,0996	0,2418	0,1472
430	432	17,9	0,0296	0,0180	0,0011	0,0122	0,0011	0,0113	0,0296	0,0180	0,0011	0,0122	0,0296	0,0180
047	433	226,9	0,3758	0,2287	0,0135	0,1628	0,0135	0,1463	0,3758	0,2287	0,0135	0,1547	0,3758	0,2287
048	434	22,3	0,0369	0,0225	0,0013	0,0113	0,0013	0,0113	0,0369	0,0225	0,0013	0,0113	0,0369	0,0225
048	435	267,0	0,4423	0,2691	0,0158	0,1852	0,0158	0,1695	0,4423	0,2691	0,0158	0,1822	0,4423	0,2691
435	436	38,0	0,0629	0,0383	0,0023	0,0279	0,0023	0,0248	0,0629	0,0383	0,0023	0,0259	0,0629	0,0383
435	437	600,7	0,9951	0,6056	0,0358	0,4137	0,0358	0,3810	0,9951	0,6056	0,0358	0,4078	0,9951	0,6056
080	438	65,5	0,1085	0,0660	0,0038	0,0456	0,0038	0,0434	0,1085	0,0660	0,0038	0,0407	0,1085	0,0660
438	439	22,0	0,0244	0,0223	0,0013	0,0150	0,0013	0,0139	0,0244	0,0223	0,0013	0,0150	0,0244	0,0223
438	440	85,7	0,1420	0,0863	0,0050	0,0585	0,0050	0,0540	0,1420	0,0863	0,0050	0,0585	0,1420	0,0863
440	441	15,6	0,0258	0,0157	0,0009	0,0106	0,0009	0,0098	0,0258	0,0157	0,0009	0,0106	0,0258	0,0157
440	442	52,1	0,0863	0,0525	0,0031	0,0355	0,0031	0,0328	0,0863	0,0525	0,0031	0,0355	0,0863	0,0525
442	443	2,5	0,0041	0,0025	0,0001	0,0017	0,0001	0,0016	0,0041	0,0025	0,0001	0,0017	0,0041	0,0025
443	444	212,8	0,3525	0,2145	0,0126	0,1542	0,0126	0,1378	0,3525	0,2145	0,0126	0,1452	0,3525	0,2145
444	445	73,9	0,1224	0,0745	0,0044	0,0530	0,0044	0,0477	0,1224	0,0745	0,0044	0,0505	0,1224	0,0745
444	446	292,5	0,4845	0,2949	0,0173	0,1995	0,0173	0,1842	0,4845	0,2949	0,0173	0,1995	0,4845	0,2949
081	447	10,9	0,0181	0,0110	0,0006	0,0080	0,0006	0,0071	0,0181	0,0110	0,0006	0,0074	0,0181	0,0110
082	448	140,7	0,2330	0,1418	0,0084	0,0959	0,0084	0,0886	0,2330	0,1418	0,0084	0,0959	0,2330	0,1418
083	449	24,0	0,0398	0,0242	0,0014	0,0164	0,0014	0,0151	0,0398	0,0242	0,0014	0,0164	0,0398	0,0242
053	450	35,9	0,0595	0,0362	0,0022	0,0249	0,0022	0,0227	0,0595	0,0362	0,0022	0,0245	0,0595	0,0362
450	451	294,8	0,4883	0,2972	0,0174	0,2011	0,0174	0,1857	0,4883	0,2972	0,0174	0,2011	0,4883	0,2972
451	452	28,9	0,0479	0,0291	0,0017	0,0197	0,0017	0,0182	0,0479	0,0291	0,0017	0,0197	0,0479	0,0291
451	453	395,7	0,6555	0,3989	0,0236	0,2700	0,0236	0,2492	0,6555	0,3989	0,0236	0,2700	0,6555	0,3989
453	454	28,4	0,0470	0,0286	0,0017	0,0194	0,0017	0,0179	0,0470	0,0286	0,0017	0,0194	0,0470	0,0286
453	455	443,2	0,7341	0,4467	0,0263	0,3024	0,0263	0,2791	0,7341	0,4467	0,0263	0,3024	0,7341	0,4467
054	456	18,0	0,0298	0,0181	0,0011	0,0123	0,0011	0,0113	0,0298	0,0181	0,0011	0,0123	0,0298	0,0181
057	457	358,7	0,5942	0,3616	0,0213	0,2501	0,0213	0,2281	0,5942	0,3616	0,0213	0,2448	0,5942	0,3616
058	458	131,7	0,2182	0,1327	0,0078	0,0937	0,0078	0,0846	0,2182	0,1327	0,0078	0,0898	0,2182	0,1327
059	459	127,4	0,2111	0,1284	0,0075	0,0903	0,0075	0,0817	0,2111	0,1284	0,0075	0,0869	0,2111	0,1284
060	460	94,5	0,1565	0,0953	0,0056	0,0694	0,0056	0,0616	0,1565	0,0953	0,0056	0,0645	0,1565	0,0953
105	461	86,0	0,1425	0,0867	0,0051	0,0587	0,0051	0,0542	0,1425	0,0867	0,0051	0,0587	0,1425	0,0867
461	462	10,9	0,0181	0,0110	0,0006	0,0074	0,0006	0,0069	0,0181	0,0110	0,0006	0,0074	0,0181	0,0110
462	463	56,7	0,0939	0,0572	0,0034	0,0416	0,0034	0,0370	0,0939	0,0572	0,0034	0,0387	0,0939	0,0572
463	464	19,5	0,0323	0,0197	0,0012	0,0133	0,0012	0,0123	0,0323	0,0197	0,0012	0,0133	0,0323	0,0197
463	465	322,4	0,5339	0,3248	0,0191	0,2199	0,0191	0,2031	0,5339	0,3248	0,0191	0,2199	0,5339	0,3248
465	466	148,4	0,2459	0,1496	0,0088	0,1012	0,0088	0,0935	0,2459	0,1496	0,0088	0,1012	0,2459	0,1496
465	467	307,9	0,5100	0,3103	0,0182	0,2101	0,0182	0,1940	0,5100	0,3103	0,0182	0,2101	0,5100	0,3103
467	468	671,2	1,1117	0,6765	0,0398	0,4578	0,0398	0,4228	1,1117	0,6765	0,0398	0,4578	1,1117	0,6765
468	469	7,9	0,0131	0,0080	0,0005	0,0054	0,0005	0,0050	0,0131	0,0080	0,0005	0,0054	0,0131	0,0080
469	470	20,6	0,0341	0,0208	0,0012	0,0141	0,0012	0,0130	0,0341	0,0208	0,0012	0,0141	0,0341	0,0208
469	471	89,9	0,1489	0,0906	0,0053	0,0613	0,0053	0,0566	0,1489	0,0906	0,0053	0,0613	0,1489	0,0906
471	472	368,8	0,6109	0,3718	0,0218	0,2516	0,0218	0,2324	0,6109	0,3718	0,0218	0,2516	0,6109	0,3718
471	473	528,5	0,8753	0,5326	0,0314	0,3659	0,0314	0,3351	0,8753	0,5326	0,0314	0,3606	0,8753	0,5326
473	474	219,3	0,3633	0,2211	0,0130	0,1497	0,0130	0,1382	0,3633	0,2211	0,0130	0,1497	0,3633	0,2211
474	475	82,3	0,1363	0,0830	0,0049	0,0561	0,0049	0,0518	0,1363	0,0830	0,0049	0,0561	0,1363	0,0830
474	476	90,0	0,1491	0,0907	0,0053	0,0614	0,0053	0,0567	0,1491	0,0907	0,0053	0,0614	0,1491	0,0907
476	477	92,3	0,1529	0,0931	0,0055	0,0630	0,0055	0,0582	0,1529	0,0931	0,0055	0,0630	0,1529	0,0931
476	478	475,6	0,7878	0,4795	0,0281	0,3296	0,0281	0,3018	0,7878	0,4795	0,0281	0,3245	0,7878	0,4795
478	479	83,4	0,1381	0,0841	0,0049	0,0603	0,0049	0,0306	0,1381	0,0841	0,0049	0,0662	0,1381	0,0841
478	480	416,9	0,6905	0,4202	0,0247	0,2909	0,0247	0,2653	0,6905	0,4202	0,0247	0,2843	0,6905	0,4202
480	481	42,9	0,0711	0,0432	0,0025	0,0293	0,0025	0,0270	0,0711	0,0432	0,0025	0,0293	0,0711	0,0432
480	482	344,5	0,5707	0,3473	0,0204	0,2350	0,0204	0,2170	0,5707	0,3473	0,0204	0,2350	0,5707	0,3473
482	483	46,5	0,0770	0,0469	0,0028	0,0317	0,0028	0,0293	0,0770	0,0469	0,0028	0,0317	0,0770	0,0469
482	484	252,7	0,4186	0,2547	0,0150	0,1724	0,0150	0,1593	0,4186	0,2547	0,0150	0,1724	0,4186	0,2547
484	485	42,3	0,0701	0,0426	0,0025	0,0289	0,0025	0,0266	0,0701	0,0426	0,0025	0,0289	0,0701	0,0426
484	486	595,3	0,9862	0,6002	0,0354	0,4113	0,0354	0,3773	0,9862	0,6002	0,0354	0,4061	0,9862	0,6002
486	487	80,8	0,1338	0,0815	0,0048	0,0551	0,0048	0,0509	0,1338	0,0815	0,0048	0,0551	0,1338	0,0815
486	488	264,1	0,4374	0,2662	0,0157	0,1856	0,0157	0,1687	0,4374	0,2662	0,0157	0,1802	0,4374	0,2662
488	489	329,4	0,5457	0,3320	0,0195	0,2288	0,0195	0,2091	0,5457	0,3320	0,0195	0,2248	0,5457	0,3320
325	490	51,7	0,0856	0,0521	0,0031	0,0380	0,0031	0,0337	0,0856	0,0521	0,0031	0,0353	0,0856	0,0521

326	491	152,0	0,2518	0,1532	0,0090	0,1077	0,0090	0,0974	0,2518	0,1532	0,0090	0,1037	0,2518	0,1532
327	492	219,2	0,3631	0,2210	0,0130	0,1495	0,0130	0,1381	0,3631	0,2210	0,0130	0,1495	0,3631	0,2210
179	493	481,7	0,7978	0,4853	0,0285	0,3286	0,0285	0,3035	0,7978	0,4853	0,0285	0,3286	0,7978	0,4853
493	494	16,6	0,0184	0,0168	0,0010	0,0113	0,0010	0,0105	0,0184	0,0168	0,0010	0,0113	0,0184	0,0168
493	495	226,0	0,3744	0,2278	0,0135	0,1541	0,0135	0,1424	0,3744	0,2278	0,0135	0,1541	0,3744	0,2278
495	496	351,2	0,5818	0,3540	0,0209	0,2395	0,0209	0,2212	0,5818	0,3540	0,0209	0,2395	0,5818	0,3540
496	497	489,5	0,8109	0,4936	0,0291	0,3339	0,0291	0,3084	0,8109	0,4936	0,0291	0,3339	0,8109	0,4936
497	498	293,8	0,4867	0,2961	0,0173	0,2004	0,0173	0,1851	0,4867	0,2961	0,0173	0,2004	0,4867	0,2961
498	499	40,7	0,0674	0,0410	0,0024	0,0278	0,0024	0,0256	0,0674	0,0410	0,0024	0,0278	0,0674	0,0410
498	500	76,0	0,1259	0,0766	0,0045	0,0519	0,0045	0,0479	0,1259	0,0766	0,0045	0,0519	0,1259	0,0766
500	501	9,2	0,0152	0,0093	0,0005	0,0063	0,0005	0,0058	0,0152	0,0093	0,0005	0,0063	0,0152	0,0093
500	502	715,4	1,1849	0,7211	0,0424	0,4880	0,0424	0,4507	1,1849	0,7211	0,0424	0,4880	1,1849	0,7211
502	503	173,0	0,2866	0,1743	0,0103	0,1203	0,0103	0,1099	0,2866	0,1743	0,0103	0,1180	0,2866	0,1743
184	504	48,3	0,0800	0,0487	0,0029	0,0330	0,0029	0,0304	0,0800	0,0487	0,0029	0,0330	0,0800	0,0487
185	505	81,5	0,1350	0,0821	0,0048	0,0599	0,0048	0,0531	0,1350	0,0821	0,0048	0,0556	0,1350	0,0821
186	506	13,6	0,0225	0,0137	0,0008	0,0093	0,0008	0,0086	0,0225	0,0137	0,0008	0,0093	0,0225	0,0137
187	507	369,5	0,6120	0,3723	0,0219	0,2542	0,0219	0,2337	0,6120	0,3723	0,0219	0,2520	0,6120	0,3723
507	508	27,6	0,0457	0,0278	0,0016	0,0188	0,0016	0,0174	0,0457	0,0278	0,0016	0,0188	0,0457	0,0278
507	509	632,7	1,0481	0,6378	0,0375	0,4328	0,0375	0,3992	1,0481	0,6378	0,0375	0,4317	1,0481	0,6378
509	510	309,0	0,5118	0,3114	0,0183	0,2108	0,0183	0,1947	0,5118	0,3114	0,0183	0,2108	0,5118	0,3114
510	511	19,4	0,0321	0,0196	0,0011	0,0142	0,0011	0,0126	0,0321	0,0196	0,0011	0,0132	0,0321	0,0196
510	512	420,3	0,6961	0,4237	0,0249	0,2868	0,0249	0,2648	0,6961	0,4237	0,0249	0,2868	0,6961	0,4237
512	513	114,7	0,1900	0,1156	0,0068	0,0783	0,0068	0,0723	0,1900	0,1156	0,0068	0,0783	0,1900	0,1156
513	514	492,2	0,8153	0,4962	0,0291	0,3400	0,0291	0,3118	0,8153	0,4962	0,0291	0,3359	0,8153	0,4962
512	515	198,0	0,3280	0,1996	0,0118	0,1411	0,0118	0,1272	0,3280	0,1996	0,0118	0,1351	0,3280	0,1996
513	516	206,7	0,3424	0,2083	0,0122	0,1410	0,0122	0,1302	0,3424	0,2083	0,0122	0,1410	0,3424	0,2083
516	517	39,6	0,0656	0,0399	0,0023	0,0270	0,0023	0,0249	0,0656	0,0399	0,0023	0,0270	0,0656	0,0399
516	518	459,1	0,7605	0,4628	0,0271	0,3234	0,0271	0,2934	0,7605	0,4628	0,0271	0,3132	0,7605	0,4628
497	519	84,4	0,1398	0,0850	0,0050	0,0576	0,0050	0,0532	0,1398	0,0850	0,0050	0,0576	0,1398	0,0850
519	520	125,9	0,2086	0,1269	0,0074	0,0858	0,0074	0,0793	0,2086	0,1269	0,0074	0,0858	0,2086	0,1269
104	521	33,7	0,0558	0,0340	0,0020	0,0230	0,0020	0,0212	0,0558	0,0340	0,0020	0,0230	0,0558	0,0340
239	522	40,0	0,0663	0,0403	0,0024	0,0273	0,0024	0,0252	0,0663	0,0403	0,0024	0,0273	0,0663	0,0403
240	523	146,0	0,2418	0,1471	0,0087	0,1009	0,0087	0,0925	0,2418	0,1471	0,0087	0,0996	0,2418	0,1471
241	524	115,0	0,1905	0,1159	0,0069	0,0818	0,0069	0,0738	0,1905	0,1159	0,0069	0,0784	0,1905	0,1159
243	525	33,8	0,0375	0,0342	0,0020	0,0231	0,0020	0,0213	0,0375	0,0342	0,0020	0,0231	0,0375	0,0342
243	526	142,2	0,1576	0,1439	0,0085	0,1004	0,0085	0,0803	0,1576	0,1439	0,0085	0,0844	0,1576	0,1439
526	527	22,6	0,0251	0,0229	0,0013	0,0154	0,0013	0,0142	0,0251	0,0229	0,0013	0,0154	0,0251	0,0229
526	528	73,0	0,0810	0,0738	0,0043	0,0517	0,0043	0,0405	0,0810	0,0738	0,0043	0,0422	0,0810	0,0738
526	529	175,6	0,1948	0,1776	0,0104	0,1242	0,0104	0,0983	0,1948	0,1776	0,0104	0,1030	0,1948	0,1776
246	530	505,5	0,8373	0,5095	0,0300	0,3484	0,0300	0,3199	0,8373	0,5095	0,0300	0,3448	0,8373	0,5095
530	531	21,8	0,0361	0,0220	0,0013	0,0149	0,0013	0,0137	0,0361	0,0220	0,0013	0,0149	0,0361	0,0220
530	532	616,1	1,0206	0,6209	0,0365	0,4262	0,0365	0,3904	1,0206	0,6209	0,0365	0,4203	1,0206	0,6209
532	533	103,7	0,1718	0,1045	0,0061	0,0707	0,0061	0,0653	0,1718	0,1045	0,0061	0,0707	0,1718	0,1045
533	534	23,9	0,0396	0,0241	0,0014	0,0163	0,0014	0,0151	0,0396	0,0241	0,0014	0,0163	0,0396	0,0241
533	535	107,1	0,1774	0,1080	0,0063	0,0731	0,0063	0,0675	0,1774	0,1080	0,0063	0,0731	0,1774	0,1080
535	536	41,4	0,0686	0,0417	0,0025	0,0282	0,0025	0,0261	0,0686	0,0417	0,0025	0,0282	0,0686	0,0417
535	537	389,2	0,6448	0,3924	0,0230	0,2656	0,0230	0,2452	0,6448	0,3924	0,0230	0,2656	0,6448	0,3924
537	538	37,3	0,0618	0,0376	0,0022	0,0254	0,0022	0,0235	0,0618	0,0376	0,0022	0,0254	0,0618	0,0376
537	539	640,8	1,0614	0,6458	0,0379	0,4371	0,0379	0,4037	1,0614	0,6458	0,0379	0,4371	1,0614	0,6458
539	540	81,2	0,1345	0,0818	0,0048	0,0554	0,0048	0,0512	0,1345	0,0818	0,0048	0,0554	0,1345	0,0818
540	541	106,8	0,1769	0,1077	0,0063	0,0729	0,0063	0,0673	0,1769	0,1077	0,0063	0,0729	0,1769	0,1077
541	542	5,2	0,0086	0,0052	0,0003	0,0035	0,0003	0,0033	0,0086	0,0052	0,0003	0,0035	0,0086	0,0052
541	543	160,1	0,2652	0,1614	0,0094	0,1093	0,0094	0,1009	0,2652	0,1614	0,0094	0,1093	0,2652	0,1614
543	544	12,4	0,0205	0,0125	0,0007	0,0085	0,0007	0,0078	0,0205	0,0125	0,0007	0,0085	0,0205	0,0125
543	545	422,4	0,6996	0,4258	0,0250	0,2882	0,0250	0,2661	0,6996	0,4258	0,0250	0,2882	0,6996	0,4258
540	546	185,8	0,3078	0,1873	0,0110	0,1320	0,0110	0,1192	0,3078	0,1873	0,0110	0,1268	0,3078	0,1873
282	547	49,6	0,0822	0,0500	0,0029	0,0364	0,0029	0,0323	0,0822	0,0500	0,0029	0,0338	0,0822	0,0500
284	548	9,2	0,0152	0,0093	0,0005	0,0063	0,0005	0,0058	0,0152	0,0093	0,0005	0,0063	0,0152	0,0093
285	549	15,3	0,0253	0,0154	0,0009	0,0104	0,0009	0,0096	0,0253	0,0154	0,0009	0,0104	0,0253	0,0154
052	550	31,3	0,0518	0,0315	0,0019	0,0214	0,0019	0,0197	0,0518	0,0315	0,0019	0,0214	0,0518	0,0315
550	551	73,0	0,1209	0,0736	0,0043	0,0536	0,0043	0,0476	0,1209	0,0736	0,0043	0,0498	0,1209	0,0736
550	552	171,1	0,2835	0,1725	0,0101	0,1167	0,0101	0,1078	0,2835	0,1725	0,0101	0,1167	0,2835	0,1725
552	553	110,5	0,1830	0,1113	0,0065	0,0754	0,0065	0,0696	0,1830	0,1113	0,0065	0,0754	0,1830	0,1113
450	554	22,5	0,0373	0,0227	0,0013	0,0154	0,0013	0,0142	0,0373	0,0227	0,0013	0,0154	0,0373	0,0227

488	555	485,0	0,8033	0,4888	0,0288	0,3309	0,0288	0,3055	0,8033	0,4888	0,0288	0,3309	0,8033	0,4888
555	556	53,6	0,0888	0,0540	0,0032	0,0394	0,0032	0,0349	0,0888	0,0540	0,0032	0,0366	0,0888	0,0540
555	557	214,5	0,3554	0,2162	0,0127	0,1472	0,0127	0,1370	0,3554	0,2162	0,0127	0,1428	0,3554	0,2162
467	558	313,7	0,5196	0,3162	0,0186	0,2140	0,0186	0,1977	0,5196	0,3162	0,0186	0,2140	0,5196	0,3162
558	559	105,8	0,1753	0,1066	0,0063	0,0731	0,0063	0,0670	0,1753	0,1066	0,0063	0,0722	0,1753	0,1066
178	560	13,9	0,0154	0,0141	0,0008	0,0095	0,0008	0,0088	0,0154	0,0141	0,0008	0,0095	0,0154	0,0141
180	561	203,7	0,3374	0,2052	0,0121	0,1399	0,0121	0,1287	0,3374	0,2052	0,0121	0,1390	0,3374	0,2052
561	562	33,6	0,0557	0,0339	0,0020	0,0229	0,0020	0,0212	0,0557	0,0339	0,0020	0,0229	0,0557	0,0339
561	563	370,2	0,6132	0,3732	0,0220	0,2526	0,0220	0,2332	0,6132	0,3732	0,0220	0,2526	0,6132	0,3732
181	564	357,2	0,5917	0,3600	0,0212	0,2488	0,0212	0,2271	0,5917	0,3600	0,0212	0,2438	0,5917	0,3600
182	565	424,7	0,7036	0,4282	0,0250	0,3081	0,0250	0,1558	0,7036	0,4282	0,0250	0,3008	0,0250	0,1858
041	566	271,4	0,4496	0,2735	0,0161	0,1893	0,0161	0,1727	0,4496	0,2735	0,0161	0,1852	0,4496	0,2735
042	567	254,5	0,4216	0,2565	0,0151	0,1800	0,0151	0,1629	0,4216	0,2565	0,0151	0,1736	0,4216	0,2565
206	568	23,1	0,0383	0,0233	0,0014	0,0170	0,0014	0,0151	0,0383	0,0233	0,0014	0,0158	0,0383	0,0233
207	569	28,9	0,0479	0,0291	0,0017	0,0197	0,0017	0,0182	0,0479	0,0291	0,0017	0,0197	0,0479	0,0291
208	570	70,2	0,1163	0,0708	0,0042	0,0479	0,0042	0,0442	0,1163	0,0708	0,0042	0,0479	0,1163	0,0708
335	571	78,1	0,1294	0,0787	0,0046	0,0574	0,0046	0,0509	0,1294	0,0787	0,0046	0,0533	0,1294	0,0787
334	572	16,8	0,0278	0,0169	0,0010	0,0115	0,0010	0,0106	0,0278	0,0169	0,0010	0,0115	0,0278	0,0169
333	573	72,4	0,1199	0,0729	0,0043	0,0494	0,0043	0,0456	0,1199	0,0729	0,0043	0,0494	0,1199	0,0729
332	574	32,9	0,0545	0,0332	0,0019	0,0224	0,0019	0,0207	0,0545	0,0332	0,0019	0,0224	0,0545	0,0332
330	575	43,0	0,0712	0,0433	0,0025	0,0293	0,0025	0,0271	0,0712	0,0433	0,0025	0,0293	0,0712	0,0433
329	576	107,3	0,1777	0,1082	0,0064	0,0788	0,0064	0,0699	0,1777	0,1082	0,0064	0,0732	0,1777	0,1082
495	577	328,0	0,5434	0,3307	0,0195	0,2238	0,0195	0,2066	0,5434	0,3307	0,0195	0,2238	0,5434	0,3307
496	578	267,0	0,4423	0,2691	0,0158	0,1860	0,0158	0,1698	0,4423	0,2691	0,0158	0,1822	0,4423	0,2691
578	579	230,5	0,3818	0,2323	0,0137	0,1650	0,0137	0,0845	0,3818	0,2323	0,0137	0,1181	0,0137	0,1008
579	580	71,2	0,1179	0,0718	0,0042	0,0515	0,0042	0,0261	0,1179	0,0718	0,0042	0,0565	0,0042	0,0311
578	581	113,7	0,1883	0,1146	0,0068	0,0776	0,0068	0,0716	0,1883	0,1146	0,0068	0,0776	0,1883	0,1146
256	582	271,4	0,4497	0,2736	0,0161	0,1852	0,0161	0,1710	0,4497	0,2736	0,0161	0,1852	0,4497	0,2736
582	583	224,4	0,3717	0,2262	0,0133	0,1590	0,0133	0,1438	0,3717	0,2262	0,0133	0,1531	0,3717	0,2262
583	584	19,6	0,0325	0,0198	0,0012	0,0134	0,0012	0,0123	0,0325	0,0198	0,0012	0,0134	0,0325	0,0198
584	585	91,5	0,1516	0,0922	0,0054	0,0657	0,0054	0,0590	0,1516	0,0922	0,0054	0,0625	0,1516	0,0922
583	586	306,0	0,5069	0,3086	0,0181	0,2148	0,0181	0,1953	0,5069	0,3086	0,0181	0,2088	0,5069	0,3086
586	587	5,2	0,0086	0,0052	0,0003	0,0035	0,0003	0,0033	0,0086	0,0052	0,0003	0,0035	0,0086	0,0052
587	588	137,5	0,1526	0,1390	0,0082	0,0980	0,0082	0,0884	0,1526	0,1390	0,0082	0,0938	0,1526	0,1390
588	589	27,2	0,0418	0,0275	0,0016	0,0185	0,0016	0,0171	0,0418	0,0275	0,0016	0,0185	0,0418	0,0275
587	590	70,4	0,1166	0,0710	0,0042	0,0480	0,0042	0,0444	0,1166	0,0710	0,0042	0,0480	0,1166	0,0710
586	591	67,8	0,1123	0,0683	0,0040	0,0498	0,0040	0,0442	0,1123	0,0683	0,0040	0,0463	0,1123	0,0683
591	592	247,4	0,4098	0,2493	0,0147	0,1663	0,0147	0,1545	0,4098	0,2493	0,0147	0,1687	0,4098	0,2493
582	593	110,2	0,1825	0,1111	0,0066	0,0778	0,0066	0,0705	0,1825	0,1111	0,0066	0,0752	0,1825	0,1111
255	594	23,3	0,0386	0,0235	0,0014	0,0161	0,0014	0,0150	0,0386	0,0235	0,0014	0,0153	0,0386	0,0235
253	595	60,1	0,0996	0,0606	0,0036	0,0410	0,0036	0,0379	0,0996	0,0606	0,0036	0,0410	0,0996	0,0606
251	596	55,8	0,0924	0,0562	0,0033	0,0381	0,0033	0,0352	0,0924	0,0562	0,0033	0,0381	0,0924	0,0562
250	597	177,9	0,2947	0,1793	0,0105	0,1214	0,0105	0,1121	0,2947	0,1793	0,0105	0,1214	0,2947	0,1793
248	598	228,7	0,3789	0,2306	0,0136	0,1560	0,0136	0,1440	0,3789	0,2306	0,0136	0,1560	0,3789	0,2306
292	599	632,1	1,0471	0,6371	0,0373	0,4363	0,0373	0,4003	1,0471	0,6371	0,0373	0,4313	1,0471	0,6371
599	600	496,6	0,8226	0,5005	0,0294	0,3387	0,0294	0,3129	0,8226	0,5005	0,0294	0,3387	0,8226	0,5005
599	601	596,7	0,9884	0,6014	0,0354	0,4111	0,0354	0,3777	0,9884	0,6014	0,0354	0,4070	0,9884	0,6014
293	602	173,3	0,2870	0,1747	0,0103	0,1182	0,0103	0,1092	0,2870	0,1747	0,0103	0,1182	0,2870	0,1747
294	603	491,6	0,8143	0,4955	0,0293	0,3354	0,0293	0,3098	0,8143	0,4955	0,0293	0,3354	0,8143	0,4955
294	604	38,7	0,0641	0,0390	0,0023	0,0284	0,0023	0,0252	0,0641	0,0390	0,0023	0,0264	0,0641	0,0390
291	605	19,9	0,0330	0,0201	0,0012	0,0136	0,0012	0,0125	0,0330	0,0201	0,0012	0,0136	0,0330	0,0201
290	606	66,7	0,1105	0,0672	0,0039	0,0490	0,0039	0,0244	0,1105	0,0672	0,0039	0,0244	0,0039	0,0292
606	607	57,3	0,0949	0,0578	0,0034	0,0391	0,0034	0,0210	0,0949	0,0578	0,0034	0,0210	0,0034	0,0250
289	608	61,3	0,1015	0,0618	0,0036	0,0450	0,0036	0,0399	0,1015	0,0618	0,0036	0,0418	0,1015	0,0618
288	609	77,9	0,1290	0,0785	0,0046	0,0531	0,0046	0,0286	0,1290	0,0785	0,0046	0,0286	0,0046	0,0341
287	610	138,3	0,2291	0,1394	0,0082	0,0943	0,0082	0,0871	0,2291	0,1394	0,0082	0,0943	0,2291	0,1394
610	611	137,1	0,2271	0,1381	0,0081	0,0935	0,0081	0,0864	0,2271	0,1381	0,0081	0,0935	0,2271	0,1381
611	612	199,5	0,3305	0,2011	0,0118	0,1367	0,0118	0,1259	0,3305	0,2011	0,0118	0,1361	0,3305	0,2011
611	613	8,6	0,0142	0,0087	0,0005	0,0059	0,0005	0,0054	0,0142	0,0087	0,0005	0,0059	0,0142	0,0087
610	614	5,8	0,0064	0,0059	0,0003	0,0040	0,0003	0,0037	0,0064	0,0059	0,0003	0,0040	0,0064	0,0059
286	615	693,2	1,1482	0,6987	0,0411	0,4787	0,0411	0,4391	1,1482	0,6987	0,0411	0,4729	1,1482	0,6987
615	616	170,4	0,2822	0,1718	0,0101	0,1163	0,0101	0,1074	0,2822	0,1718	0,0101	0,1163	0,2822	0,1718
264	617	659,9	1,0931	0,6655	0,0392	0,4544	0,0392	0,4174	1,0931	0,6655	0,0392	0,4501	1,0931	0,6655
342	618	314,4	0,5208	0,3168	0,0186	0,2145	0,0186	0,1981	0,5208	0,3168	0,0186	0,2145	0,5208	0,3168

606	619	69,0	0,1143	0,0695	0,0041	0,0471	0,0041	0,0253	0,1143	0,0695	0,0041	0,0253	0,0041	0,0302
064	620	39,8	0,0442	0,0402	0,0024	0,0271	0,0024	0,0251	0,0442	0,0402	0,0024	0,0271	0,0442	0,0402
620	621	64,9	0,0720	0,0656	0,0038	0,0443	0,0038	0,0409	0,0720	0,0656	0,0038	0,0443	0,0720	0,0656
064	622	68,2	0,0757	0,0690	0,0041	0,0465	0,0041	0,0430	0,0757	0,0690	0,0041	0,0465	0,0757	0,0690
622	623	19,7	0,0219	0,0199	0,0012	0,0134	0,0012	0,0124	0,0219	0,0199	0,0012	0,0134	0,0219	0,0199
623	624	65,6	0,0728	0,0663	0,0039	0,0448	0,0039	0,0413	0,0728	0,0663	0,0039	0,0448	0,0728	0,0663
623	625	67,2	0,0745	0,0680	0,0040	0,0458	0,0040	0,0423	0,0745	0,0680	0,0040	0,0458	0,0745	0,0680
623	626	30,4	0,0337	0,0307	0,0018	0,0207	0,0018	0,0192	0,0337	0,0307	0,0018	0,0207	0,0337	0,0307
620	627	47,6	0,0528	0,0481	0,0028	0,0316	0,0028	0,0295	0,0528	0,0481	0,0028	0,0324	0,0528	0,0481
627	628	78,8	0,0874	0,0797	0,0046	0,0537	0,0046	0,0496	0,0874	0,0797	0,0046	0,0537	0,0874	0,0797
628	629	188,1	0,2087	0,1902	0,0112	0,1283	0,0112	0,1184	0,2087	0,1902	0,0112	0,1283	0,2087	0,1902
629	630	15,0	0,0166	0,0152	0,0009	0,0102	0,0009	0,0094	0,0166	0,0152	0,0009	0,0102	0,0166	0,0152
630	631	106,2	0,1178	0,1074	0,0064	0,0724	0,0064	0,0669	0,1178	0,1074	0,0064	0,0724	0,1178	0,1074
628	632	20,4	0,0226	0,0206	0,0012	0,0139	0,0012	0,0129	0,0226	0,0206	0,0012	0,0139	0,0226	0,0206
632	633	88,1	0,0978	0,0891	0,0052	0,0601	0,0052	0,0555	0,0978	0,0891	0,0052	0,0601	0,0978	0,0891
633	634	41,5	0,0460	0,0420	0,0025	0,0283	0,0025	0,0261	0,0460	0,0420	0,0025	0,0283	0,0460	0,0420
629	635	12,8	0,0142	0,0129	0,0008	0,0087	0,0008	0,0081	0,0142	0,0129	0,0008	0,0087	0,0142	0,0129
627	636	68,0	0,0755	0,0688	0,0041	0,0464	0,0041	0,0428	0,0755	0,0688	0,0041	0,0464	0,0755	0,0688
627	637	21,0	0,0233	0,0212	0,0012	0,0143	0,0012	0,0132	0,0233	0,0212	0,0012	0,0143	0,0233	0,0212
055	638	38,4	0,0636	0,0387	0,0023	0,0262	0,0023	0,0242	0,0636	0,0387	0,0023	0,0262	0,0636	0,0387
473	639	199,5	0,3305	0,2011	0,0118	0,1413	0,0118	0,1279	0,3305	0,2011	0,0118	0,1361	0,3305	0,2011
209	640	25,5	0,0422	0,0257	0,0015	0,0174	0,0015	0,0161	0,0422	0,0257	0,0015	0,0174	0,0422	0,0257
086	641	80,1	0,0889	0,0810	0,0048	0,0546	0,0048	0,0505	0,0889	0,0810	0,0048	0,0546	0,0889	0,0810
641	642	22,6	0,0251	0,0229	0,0013	0,0154	0,0013	0,0142	0,0251	0,0229	0,0013	0,0154	0,0251	0,0229
642	643	55,5	0,0616	0,0562	0,0033	0,0379	0,0033	0,0350	0,0616	0,0562	0,0033	0,0379	0,0616	0,0562
519	644	426,6	0,4733	0,4314	0,0252	0,3016	0,0252	0,2731	0,4733	0,4314	0,0252	0,2911	0,4733	0,4314
644	645	49,2	0,0546	0,0498	0,0029	0,0250	0,0029	0,0250	0,0546	0,0498	0,0029	0,0250	0,0546	0,0498
069	646	20,2	0,0224	0,0204	0,0012	0,0138	0,0012	0,0127	0,0224	0,0204	0,0012	0,0138	0,0224	0,0204
065	647	15,9	0,0176	0,0161	0,0009	0,0108	0,0009	0,0100	0,0176	0,0161	0,0009	0,0108	0,0176	0,0161
629	648	64,4	0,0714	0,0651	0,0038	0,0440	0,0038	0,0405	0,0714	0,0651	0,0038	0,0440	0,0714	0,0651
066	649	65,7	0,0729	0,0665	0,0039	0,0448	0,0039	0,0414	0,0729	0,0665	0,0039	0,0448	0,0729	0,0665
110	650	60,4	0,0670	0,0610	0,0036	0,0412	0,0036	0,0380	0,0670	0,0610	0,0036	0,0412	0,0670	0,0610
650	651	185,4	0,2057	0,1876	0,0111	0,1265	0,0111	0,1168	0,2057	0,1876	0,0111	0,1265	0,2057	0,1876
112	652	8,1	0,0090	0,0082	0,0005	0,0055	0,0005	0,0051	0,0090	0,0082	0,0005	0,0055	0,0090	0,0082
113	653	9,5	0,0105	0,0096	0,0006	0,0065	0,0006	0,0060	0,0105	0,0096	0,0006	0,0065	0,0105	0,0096
112	654	21,7	0,0241	0,0219	0,0013	0,0148	0,0013	0,0137	0,0241	0,0219	0,0013	0,0148	0,0241	0,0219
129	655	33,0	0,0366	0,0334	0,0020	0,0225	0,0020	0,0208	0,0366	0,0334	0,0020	0,0225	0,0366	0,0334
655	656	9,1	0,0101	0,0092	0,0005	0,0062	0,0005	0,0057	0,0101	0,0092	0,0005	0,0062	0,0101	0,0092
655	657	9,1	0,0101	0,0092	0,0005	0,0062	0,0005	0,0057	0,0101	0,0092	0,0005	0,0062	0,0101	0,0092
128	658	9,5	0,0105	0,0096	0,0006	0,0065	0,0006	0,0060	0,0105	0,0096	0,0006	0,0065	0,0105	0,0096
129	659	9,6	0,0107	0,0097	0,0006	0,0065	0,0006	0,0060	0,0107	0,0097	0,0006	0,0065	0,0107	0,0097
111	660	9,0	0,0100	0,0091	0,0005	0,0061	0,0005	0,0057	0,0100	0,0091	0,0005	0,0061	0,0100	0,0091
108	661	7,3	0,0081	0,0074	0,0004	0,0050	0,0004	0,0046	0,0081	0,0074	0,0004	0,0050	0,0081	0,0074
100	662	14,5	0,0110	0,0106	0,0009	0,0094	0,0009	0,0089	0,0110	0,0106	0,0009	0,0099	0,0110	0,0106
100	663	30,0	0,0333	0,0303	0,0018	0,0205	0,0018	0,0189	0,0333	0,0303	0,0018	0,0205	0,0333	0,0303
098	664	13,8	0,0153	0,0140	0,0008	0,0094	0,0008	0,0087	0,0153	0,0140	0,0008	0,0094	0,0153	0,0140
114	665	147,1	0,1633	0,1488	0,0088	0,1003	0,0088	0,0927	0,1633	0,1488	0,0088	0,1003	0,1633	0,1488
113	666	85,9	0,0953	0,0869	0,0051	0,0586	0,0051	0,0541	0,0953	0,0869	0,0051	0,0586	0,0953	0,0869
666	667	127,2	0,1412	0,1286	0,0075	0,0868	0,0075	0,0801	0,1412	0,1286	0,0075	0,0868	0,1412	0,1286
667	668	98,9	0,1097	0,0999	0,0059	0,0674	0,0059	0,0624	0,1097	0,0999	0,0059	0,0674	0,1097	0,0999
667	669	10,5	0,0116	0,0106	0,0006	0,0072	0,0006	0,0066	0,0116	0,0106	0,0006	0,0072	0,0116	0,0106
667	670	23,9	0,0265	0,0242	0,0014	0,0163	0,0014	0,0151	0,0265	0,0242	0,0014	0,0163	0,0265	0,0242
650	671	17,1	0,0190	0,0173	0,0010	0,0117	0,0010	0,0108	0,0190	0,0173	0,0010	0,0117	0,0190	0,0173
650	672	19,4	0,0215	0,0196	0,0011	0,0132	0,0011	0,0122	0,0215	0,0196	0,0011	0,0132	0,0215	0,0196
128	673	9,5	0,0105	0,0096	0,0006	0,0065	0,0006	0,0060	0,0105	0,0096	0,0006	0,0065	0,0105	0,0096
123	674	3,7	0,0009	0,0033	0,0002	0,0025	0,0002	0,0023	0,0009	0,0033	0,0002	0,0025	0,0009	0,0033
121	675	7,6	0,0084	0,0077	0,0005	0,0052	0,0005	0,0048	0,0084	0,0077	0,0005	0,0052	0,0084	0,0077
097	676	9,0	0,0100	0,0091	0,0005	0,0061	0,0005	0,0057	0,0100	0,0091	0,0005	0,0061	0,0100	0,0091
655	677	70,4	0,0781	0,0712	0,0042	0,0480	0,0042	0,0443	0,0781	0,0712	0,0042	0,0480	0,0781	0,0712
125	678	154,9	0,1719	0,1568	0,0091	0,1057	0,0091	0,0976	0,1719	0,1568	0,0091	0,1057	0,1719	0,1568
678	679	32,0	0,0355	0,0324	0,0019	0,0218	0,0019	0,0202	0,0355	0,0324	0,0019	0,0218	0,0355	0,0324
139	680	131,2	0,1456	0,1327	0,0078	0,0896	0,0078	0,0827	0,1456	0,1327	0,0078	0,0896	0,1456	0,1327
091	681	12,1	0,0030	0,0108	0,0007	0,0083	0,0007	0,0076	0,0030	0,0108	0,0007	0,0083	0,0030	0,0108
092	682	20,4	0,0226	0,0206	0,0012	0,0139	0,0012	0,0129	0,0226	0,0206	0,0012	0,0139	0,0226	0,0206

144	683	78,3	0,0869	0,0792	0,0046	0,0533	0,0046	0,0494	0,0869	0,0792	0,0046	0,0533	0,0869	0,0792
120	684	55,0	0,0610	0,0557	0,0033	0,0375	0,0033	0,0346	0,0610	0,0557	0,0033	0,0375	0,0610	0,0557
169	685	79,9	0,0886	0,0808	0,0047	0,0545	0,0047	0,0503	0,0886	0,0808	0,0047	0,0545	0,0886	0,0808
685	686	57,4	0,0637	0,0580	0,0034	0,0392	0,0034	0,0362	0,0637	0,0580	0,0034	0,0392	0,0637	0,0580
686	687	71,8	0,0797	0,0726	0,0043	0,0490	0,0043	0,0452	0,0797	0,0726	0,0043	0,0490	0,0797	0,0726
686	688	16,7	0,0185	0,0169	0,0010	0,0114	0,0010	0,0105	0,0185	0,0169	0,0010	0,0114	0,0185	0,0169
686	689	33,2	0,0368	0,0336	0,0019	0,0227	0,0019	0,0210	0,0368	0,0336	0,0019	0,0227	0,0368	0,0336
169	690	5,6	0,0062	0,0057	0,0003	0,0038	0,0003	0,0035	0,0062	0,0057	0,0003	0,0038	0,0062	0,0057
685	691	31,4	0,0348	0,0318	0,0019	0,0214	0,0019	0,0198	0,0348	0,0318	0,0019	0,0214	0,0348	0,0318
120	692	7,7	0,0085	0,0078	0,0005	0,0053	0,0005	0,0049	0,0085	0,0078	0,0005	0,0053	0,0085	0,0078
228	693	40,4	0,0448	0,0409	0,0024	0,0276	0,0024	0,0255	0,0448	0,0409	0,0024	0,0276	0,0448	0,0409
226	694	7,1	0,0079	0,0072	0,0004	0,0048	0,0004	0,0045	0,0079	0,0072	0,0004	0,0048	0,0079	0,0072
121	695	15,1	0,0168	0,0153	0,0009	0,0103	0,0009	0,0095	0,0168	0,0153	0,0009	0,0103	0,0168	0,0153
231	696	42,7	0,0474	0,0432	0,0025	0,0291	0,0025	0,0269	0,0474	0,0432	0,0025	0,0291	0,0474	0,0432
696	697	47,6	0,0528	0,0482	0,0028	0,0324	0,0028	0,0300	0,0528	0,0482	0,0028	0,0324	0,0528	0,0482
697	698	45,9	0,0510	0,0465	0,0027	0,0313	0,0027	0,0289	0,0510	0,0465	0,0027	0,0313	0,0510	0,0465
698	699	49,5	0,0549	0,0500	0,0030	0,0338	0,0030	0,0312	0,0549	0,0500	0,0030	0,0338	0,0549	0,0500
699	700	85,8	0,0951	0,0868	0,0052	0,0586	0,0052	0,0540	0,0951	0,0868	0,0052	0,0586	0,0951	0,0868
700	701	6,6	0,0073	0,0067	0,0004	0,0045	0,0004	0,0042	0,0073	0,0067	0,0004	0,0045	0,0073	0,0067
700	702	44,5	0,0494	0,0450	0,0026	0,0304	0,0026	0,0280	0,0494	0,0450	0,0026	0,0304	0,0494	0,0450
702	703	88,4	0,0981	0,0895	0,0052	0,0603	0,0052	0,0557	0,0981	0,0895	0,0052	0,0603	0,0981	0,0895
703	704	16,4	0,0182	0,0166	0,0010	0,0112	0,0010	0,0103	0,0182	0,0166	0,0010	0,0112	0,0182	0,0166
702	705	9,8	0,0109	0,0099	0,0006	0,0067	0,0006	0,0062	0,0109	0,0099	0,0006	0,0067	0,0109	0,0099
231	706	59,7	0,0663	0,0604	0,0035	0,0407	0,0035	0,0376	0,0663	0,0604	0,0035	0,0407	0,0663	0,0604
696	707	25,8	0,0286	0,0261	0,0015	0,0176	0,0015	0,0163	0,0286	0,0261	0,0015	0,0176	0,0286	0,0261
696	708	9,1	0,0101	0,0092	0,0005	0,0062	0,0005	0,0057	0,0101	0,0092	0,0005	0,0062	0,0101	0,0092
230	709	16,4	0,0124	0,0112	0,0010	0,0112	0,0010	0,0103	0,0124	0,0112	0,0010	0,0112	0,0124	0,0112
124	710	181,1	0,1368	0,1283	0,0107	0,1236	0,0107	0,1140	0,1368	0,1283	0,0107	0,1236	0,1368	0,1283
710	711	292,5	0,2210	0,2945	0,0174	0,1996	0,0174	0,1842	0,2210	0,2945	0,0174	0,1996	0,2210	0,2945
711	712	128,1	0,0969	0,1289	0,0075	0,0873	0,0075	0,0806	0,0969	0,1289	0,0075	0,0873	0,0969	0,1289
230	713	27,7	0,0209	0,0279	0,0016	0,0189	0,0016	0,0175	0,0209	0,0279	0,0016	0,0189	0,0209	0,0279
229	714	95,6	0,1061	0,0967	0,0056	0,0651	0,0056	0,0602	0,1061	0,0967	0,0056	0,0651	0,1061	0,0967
642	715	274,7	0,3049	0,2777	0,0162	0,1873	0,0162	0,1729	0,3049	0,2777	0,0162	0,1873	0,3049	0,2777
698	716	15,2	0,0169	0,0154	0,0009	0,0104	0,0009	0,0096	0,0169	0,0154	0,0009	0,0104	0,0169	0,0154
698	717	7,1	0,0079	0,0072	0,0004	0,0048	0,0004	0,0045	0,0079	0,0072	0,0004	0,0048	0,0079	0,0072
702	718	15,6	0,0173	0,0158	0,0009	0,0106	0,0009	0,0098	0,0173	0,0158	0,0009	0,0106	0,0173	0,0158
700	719	15,5	0,0172	0,0157	0,0009	0,0106	0,0009	0,0098	0,0172	0,0157	0,0009	0,0106	0,0172	0,0157
699	720	12,8	0,0142	0,0129	0,0008	0,0087	0,0008	0,0081	0,0142	0,0129	0,0008	0,0087	0,0142	0,0129
699	721	9,5	0,0105	0,0096	0,0006	0,0065	0,0006	0,0060	0,0105	0,0096	0,0006	0,0065	0,0105	0,0096
703	722	10,6	0,0118	0,0107	0,0006	0,0072	0,0006	0,0067	0,0118	0,0107	0,0006	0,0072	0,0118	0,0107
703	723	81,8	0,0908	0,0827	0,0048	0,0558	0,0048	0,0516	0,0908	0,0827	0,0048	0,0558	0,0908	0,0827
229	724	25,1	0,0278	0,0254	0,0015	0,0171	0,0015	0,0158	0,0278	0,0254	0,0015	0,0171	0,0278	0,0254
225	725	65,6	0,0728	0,0664	0,0039	0,0442	0,0039	0,0410	0,0728	0,0664	0,0039	0,0442	0,0728	0,0664
228	726	6,4	0,0071	0,0065	0,0004	0,0044	0,0004	0,0040	0,0071	0,0065	0,0004	0,0044	0,0071	0,0065
226	727	7,1	0,0079	0,0072	0,0004	0,0048	0,0004	0,0045	0,0079	0,0072	0,0004	0,0048	0,0079	0,0072
147	728	20,0	0,0151	0,0201	0,0012	0,0136	0,0012	0,0126	0,0151	0,0201	0,0012	0,0136	0,0151	0,0201
132	729	17,5	0,0194	0,0177	0,0010	0,0119	0,0010	0,0110	0,0194	0,0177	0,0010	0,0119	0,0194	0,0177
132	730	5,9	0,0065	0,0060	0,0003	0,0040	0,0003	0,0037	0,0065	0,0060	0,0003	0,0040	0,0065	0,0060
147	731	146,1	0,1031	0,1446	0,0086	0,0996	0,0086	0,0920	0,1031	0,1446	0,0086	0,0996	0,1031	0,1446
731	732	35,2	0,0266	0,0354	0,0021	0,0240	0,0021	0,0222	0,0266	0,0354	0,0021	0,0240	0,0266	0,0354
091	733	26,2	0,0065	0,0233	0,0016	0,0179	0,0016	0,0165	0,0065	0,0233	0,0016	0,0179	0,0065	0,0233
090	734	122,6	0,1360	0,1240	0,0072	0,0837	0,0072	0,0773	0,1360	0,1240	0,0072	0,0837	0,1360	0,1240
110	735	9,4	0,0104	0,0095	0,0006	0,0064	0,0006	0,0059	0,0104	0,0095	0,0006	0,0064	0,0104	0,0095
154	736	85,5	0,0949	0,0865	0,0051	0,0583	0,0051	0,0539	0,0949	0,0865	0,0051	0,0583	0,0949	0,0865
736	737	171,5	0,1903	0,1734	0,0102	0,1170	0,0102	0,1079	0,1903	0,1734	0,0102	0,1170	0,1903	0,1734
737	738	102,0	0,1133	0,1031	0,0061	0,0711	0,0061	0,0600	0,1133	0,1031	0,0061	0,0637	0,1133	0,1031
738	739	17,2	0,0191	0,0174	0,0010	0,0117	0,0010	0,0108	0,0191	0,0174	0,0010	0,0117	0,0191	0,0174
738	740	49,4	0,0548	0,0500	0,0029	0,0337	0,0029	0,0311	0,0548	0,0500	0,0029	0,0337	0,0548	0,0500
738	741	26,8	0,0297	0,0271	0,0016	0,0183	0,0016	0,0169	0,0297	0,0271	0,0016	0,0183	0,0297	0,0271
697	742	31,6	0,0351	0,0320	0,0019	0,0216	0,0019	0,0199	0,0351	0,0320	0,0019	0,0216	0,0351	0,0320
742	743	154,7	0,1717	0,1566	0,0092	0,1056	0,0092	0,0975	0,1717	0,1566	0,0092	0,1056	0,1717	0,1566
697	744	158,6	0,1760	0,1605	0,0093	0,1082	0,0093	0,1000	0,1760	0,1605	0,0093	0,1082	0,1760	0,1605
218	745	144,4	0,2391	0,1456	0,0085	0,0985	0,0085	0,0910	0,2391	0,1456	0,0085	0,0985	0,2391	0,1456
205	746	83,4	0,1381	0,0841	0,0049	0,0569	0,0049	0,0525	0,1381	0,0841	0,0049	0,0569	0,1381	0,0841

591	747	256,8	0,4253	0,2588	0,0152	0,1752	0,0152	0,1618	0,4253	0,2588	0,0152	0,1752	0,4253	0,2588
063	748	4,9	0,0054	0,0050	0,0003	0,0033	0,0003	0,0031	0,0054	0,0050	0,0003	0,0033	0,0054	0,0050
063	749	4,9	0,0054	0,0050	0,0003	0,0033	0,0003	0,0031	0,0054	0,0050	0,0003	0,0033	0,0054	0,0050
061	750	4,8	0,0053	0,0049	0,0003	0,0033	0,0003	0,0030	0,0053	0,0049	0,0003	0,0033	0,0053	0,0049
062	751	4,5	0,0050	0,0046	0,0003	0,0031	0,0003	0,0028	0,0050	0,0046	0,0003	0,0031	0,0050	0,0046
198	752	3,4	0,0021	0,0034	0,0002	0,0023	0,0002	0,0021	0,0021	0,0034	0,0002	0,0023	0,0021	0,0034
037	753	62,0	0,0153	0,0552	0,0037	0,0423	0,0037	0,0391	0,0153	0,0552	0,0037	0,0423	0,0153	0,0552
753	754	56,6	0,0140	0,0503	0,0034	0,0386	0,0034	0,0357	0,0140	0,0503	0,0034	0,0386	0,0140	0,0503
374	755	107,0	0,0659	0,1066	0,0063	0,0757	0,0063	0,0685	0,0659	0,1066	0,0063	0,0730	0,0659	0,1066
099	756	11,6	0,0129	0,0117	0,0007	0,0079	0,0007	0,0073	0,0129	0,0117	0,0007	0,0079	0,0129	0,0117
123	757	3,7	0,0028	0,0037	0,0002	0,0025	0,0002	0,0023	0,0028	0,0037	0,0002	0,0025	0,0028	0,0037
062	758	4,5	0,0050	0,0046	0,0003	0,0031	0,0003	0,0028	0,0050	0,0046	0,0003	0,0031	0,0050	0,0046
086	759	12,8	0,0142	0,0129	0,0008	0,0087	0,0008	0,0081	0,0142	0,0129	0,0008	0,0087	0,0142	0,0129
026	760	5,0	0,0055	0,0051	0,0003	0,0034	0,0003	0,0031	0,0055	0,0051	0,0003	0,0034	0,0055	0,0051
027	761	8,3	0,0092	0,0084	0,0005	0,0057	0,0005	0,0052	0,0092	0,0084	0,0005	0,0057	0,0092	0,0084
026	762	15,0	0,0166	0,0152	0,0009	0,0102	0,0009	0,0094	0,0166	0,0152	0,0009	0,0102	0,0166	0,0152
029	763	5,4	0,0060	0,0055	0,0003	0,0037	0,0003	0,0034	0,0060	0,0055	0,0003	0,0037	0,0060	0,0055
029	764	18,7	0,0207	0,0189	0,0011	0,0128	0,0011	0,0118	0,0207	0,0189	0,0011	0,0128	0,0207	0,0189
173	765	21,7	0,0241	0,0219	0,0013	0,0148	0,0013	0,0137	0,0241	0,0219	0,0013	0,0148	0,0241	0,0219
173	766	8,3	0,0092	0,0084	0,0005	0,0057	0,0005	0,0052	0,0092	0,0084	0,0005	0,0057	0,0092	0,0084
034	767	8,8	0,0022	0,0077	0,0005	0,0060	0,0005	0,0055	0,0022	0,0077	0,0005	0,0060	0,0022	0,0077
034	768	8,8	0,0022	0,0078	0,0005	0,0060	0,0005	0,0055	0,0022	0,0078	0,0005	0,0060	0,0022	0,0078
035	769	3,7	0,0041	0,0037	0,0002	0,0025	0,0002	0,0023	0,0041	0,0037	0,0002	0,0025	0,0041	0,0037
024	770	41,8	0,0464	0,0423	0,0025	0,0285	0,0025	0,0263	0,0464	0,0423	0,0025	0,0285	0,0464	0,0423
036	771	10,2	0,0113	0,0103	0,0006	0,0070	0,0006	0,0064	0,0113	0,0103	0,0006	0,0070	0,0113	0,0103
037	772	23,4	0,0260	0,0237	0,0014	0,0160	0,0014	0,0147	0,0260	0,0237	0,0014	0,0160	0,0260	0,0237
020	773	24,0	0,0266	0,0243	0,0014	0,0164	0,0014	0,0151	0,0266	0,0243	0,0014	0,0164	0,0266	0,0243
165	774	17,7	0,0196	0,0179	0,0010	0,0121	0,0010	0,0112	0,0196	0,0179	0,0010	0,0121	0,0196	0,0179
165	775	3,0	0,0033	0,0030	0,0002	0,0020	0,0002	0,0019	0,0033	0,0030	0,0002	0,0020	0,0033	0,0030
158	776	4,0	0,0044	0,0040	0,0002	0,0027	0,0002	0,0025	0,0044	0,0040	0,0002	0,0027	0,0044	0,0040
160	777	21,6	0,0240	0,0218	0,0013	0,0147	0,0013	0,0136	0,0240	0,0218	0,0013	0,0147	0,0240	0,0218
017	778	23,5	0,0261	0,0238	0,0014	0,0160	0,0014	0,0148	0,0261	0,0238	0,0014	0,0160	0,0261	0,0238
162	779	18,8	0,0209	0,0190	0,0011	0,0128	0,0011	0,0118	0,0209	0,0190	0,0011	0,0128	0,0209	0,0190
162	780	32,1	0,0356	0,0325	0,0019	0,0219	0,0019	0,0202	0,0356	0,0325	0,0019	0,0219	0,0356	0,0325
380	781	490,3	0,8121	0,4942	0,0291	0,3397	0,0291	0,3112	0,8121	0,4942	0,0291	0,3346	0,8121	0,4942
781	782	115,8	0,1919	0,1167	0,0068	0,0790	0,0068	0,0730	0,1919	0,1167	0,0068	0,0790	0,1919	0,1167
003	783	10,2	0,0025	0,0091	0,0006	0,0070	0,0006	0,0064	0,0025	0,0091	0,0006	0,0070	0,0025	0,0091
003	784	10,2	0,0025	0,0091	0,0006	0,0070	0,0006	0,0064	0,0025	0,0091	0,0006	0,0070	0,0025	0,0091
004	785	21,2	0,0052	0,0189	0,0013	0,0145	0,0013	0,0134	0,0052	0,0189	0,0013	0,0145	0,0052	0,0189
004	786	13,4	0,0033	0,0119	0,0008	0,0091	0,0008	0,0084	0,0033	0,0119	0,0008	0,0091	0,0033	0,0119
005	787	17,2	0,0042	0,0153	0,0010	0,0117	0,0010	0,0108	0,0042	0,0153	0,0010	0,0117	0,0042	0,0153
005	788	13,7	0,0034	0,0122	0,0008	0,0093	0,0008	0,0086	0,0034	0,0122	0,0008	0,0093	0,0034	0,0122
283	789	19,1	0,0316	0,0193	0,0011	0,0130	0,0011	0,0070	0,0316	0,0193	0,0011	0,0070	0,0011	0,0083
008	790	17,2	0,0042	0,0153	0,0010	0,0117	0,0010	0,0108	0,0042	0,0153	0,0010	0,0117	0,0042	0,0153
008	791	17,8	0,0044	0,0158	0,0011	0,0121	0,0011	0,0112	0,0044	0,0158	0,0011	0,0121	0,0044	0,0158
300	792	475,7	0,7879	0,4796	0,0281	0,2457	0,0281	0,1913	0,7879	0,4796	0,0281	0,1913	0,2188	0,2761
792	793	290,5	0,4811	0,2929	0,0172	0,1478	0,0172	0,1064	0,4811	0,2929	0,0172	0,1064	0,0172	0,1269
040	794	9,8	0,0060	0,0098	0,0006	0,0067	0,0006	0,0062	0,0060	0,0098	0,0006	0,0067	0,0060	0,0098
040	795	9,8	0,0024	0,0087	0,0006	0,0072	0,0006	0,0064	0,0024	0,0087	0,0006	0,0067	0,0024	0,0087
012	796	7,1	0,0018	0,0063	0,0004	0,0052	0,0004	0,0046	0,0018	0,0063	0,0004	0,0048	0,0018	0,0063
014	797	9,4	0,0023	0,0084	0,0006	0,0069	0,0006	0,0061	0,0023	0,0084	0,0006	0,0064	0,0023	0,0084
013	798	7,6	0,0084	0,0077	0,0005	0,0056	0,0005	0,0050	0,0084	0,0077	0,0005	0,0052	0,0084	0,0077
095	799	15,6	0,0118	0,0157	0,0009	0,0106	0,0009	0,0098	0,0118	0,0157	0,0009	0,0106	0,0118	0,0157
369	800	197,5	0,3272	0,1991	0,0117	0,1348	0,0117	0,1244	0,3272	0,1991	0,0117	0,1348	0,3272	0,1991
588	801	5,9	0,0098	0,0059	0,0003	0,0043	0,0003	0,0022	0,0098	0,0059	0,0003	0,0022	0,0003	0,0026
588	802	208,3	0,3451	0,2099	0,0123	0,1518	0,0123	0,0764	0,3451	0,2099	0,0123	0,1227	0,0123	0,0911
443	803	64,1	0,1062	0,0646	0,0038	0,0437	0,0038	0,0404	0,1062	0,0646	0,0038	0,0437	0,1062	0,0646
295	804	45,0	0,0745	0,0454	0,0027	0,0307	0,0027	0,0165	0,0745	0,0454	0,0027	0,0165	0,0027	0,0197
792	805	97,0	0,1212	0,0980	0,0058	0,0672	0,0058	0,0462	0,1212	0,0980	0,0058	0,0355	0,0058	0,0424
805	806	183,7	0,3043	0,1851	0,0109	0,1142	0,0109	0,0673	0,3043	0,1851	0,0109	0,0673	0,0109	0,0802
399	807	367,8	0,6093	0,3707	0,0218	0,2554	0,0218	0,1347	0,6093	0,3707	0,0218	0,1811	0,0218	0,1608
296	808	88,6	0,1468	0,0893	0,0052	0,0451	0,0052	0,0325	0,1468	0,0893	0,0052	0,0325	0,0052	0,0387
552	809	79,6	0,1319	0,0802	0,0047	0,0543	0,0047	0,0501	0,1319	0,0802	0,0047	0,0543	0,1319	0,0802
809	810	51,0	0,0845	0,0514	0,0030	0,0348	0,0030	0,0187	0,0845	0,0514	0,0030	0,0187	0,0030	0,0223

579	811	233,3	0,3864	0,2351	0,0138	0,1653	0,0138	0,0856	0,3864	0,2351	0,0138	0,0856	0,0138	0,1019
025	812	62,0	0,0688	0,0627	0,0037	0,0451	0,0037	0,0402	0,0688	0,0627	0,0037	0,0423	0,0688	0,0627
246	813	17,7	0,0109	0,0176	0,0010	0,0121	0,0010	0,0112	0,0109	0,0176	0,0010	0,0121	0,0109	0,0176
245	814	20,6	0,0127	0,0205	0,0012	0,0141	0,0012	0,0130	0,0127	0,0205	0,0012	0,0141	0,0127	0,0205
204	815	30,0	0,0497	0,0302	0,0018	0,0205	0,0018	0,0189	0,0497	0,0302	0,0018	0,0205	0,0497	0,0302
461	816	214,3	0,3551	0,2160	0,0127	0,1544	0,0127	0,0786	0,3551	0,2160	0,0127	0,1167	0,0127	0,0937
259	817	86,8	0,1438	0,0875	0,0051	0,0441	0,0051	0,0318	0,1438	0,0875	0,0051	0,0318	0,0051	0,0379
584	818	355,9	0,5896	0,3587	0,0211	0,2588	0,0211	0,2490	0,5896	0,3587	0,0211	0,2015	0,5896	0,3587
818	819	296,7	0,4915	0,2991	0,0175	0,1901	0,0175	0,1087	0,4915	0,2991	0,0175	0,1087	0,0175	0,1298
340	820	96,7	0,1602	0,0975	0,0057	0,0660	0,0057	0,0354	0,1602	0,0975	0,0057	0,0354	0,0057	0,0423
204	821	30,0	0,0497	0,0302	0,0018	0,0205	0,0018	0,0189	0,0497	0,0302	0,0018	0,0205	0,0497	0,0302
069	822	74,6	0,0828	0,0755	0,0044	0,0509	0,0044	0,0470	0,0828	0,0755	0,0044	0,0509	0,0828	0,0755
822	823	199,1	0,2178	0,1996	0,0118	0,1323	0,0118	0,1231	0,2178	0,1996	0,0118	0,1358	0,2178	0,1996
558	824	424,5	0,7032	0,4279	0,0251	0,2896	0,0251	0,2675	0,7032	0,4279	0,0251	0,2896	0,7032	0,4279
824	825	137,7	0,2281	0,1388	0,0082	0,0701	0,0082	0,0505	0,2281	0,1388	0,0082	0,0505	0,0082	0,0602
644	826	79,4	0,0881	0,0803	0,0047	0,0583	0,0047	0,0517	0,0881	0,0803	0,0047	0,0542	0,0881	0,0803
030	827	279,3	0,3099	0,2824	0,0166	0,1828	0,0166	0,1077	0,3099	0,2824	0,0166	0,1092	0,0395	0,1346
213	828	457,1	0,7571	0,4606	0,0271	0,3035	0,0271	0,2804	0,7571	0,4606	0,0271	0,2980	0,7571	0,4606
828	829	90,4	0,1497	0,0911	0,0053	0,0460	0,0053	0,0331	0,1497	0,0911	0,0053	0,0331	0,0053	0,0395
105	830	30,0	0,0497	0,0302	0,0018	0,0205	0,0018	0,0189	0,0497	0,0302	0,0018	0,0205	0,0497	0,0302
194	831	8,7	0,0097	0,0088	0,0005	0,0059	0,0005	0,0055	0,0097	0,0088	0,0005	0,0059	0,0097	0,0088
781	832	142,6	0,2363	0,1437	0,0084	0,0973	0,0084	0,0898	0,2363	0,1437	0,0084	0,0973	0,2363	0,1437
442	833	2,5	0,0041	0,0025	0,0001	0,0017	0,0001	0,0016	0,0041	0,0025	0,0001	0,0017	0,0041	0,0025
074	834	3,7	0,0061	0,0037	0,0002	0,0025	0,0002	0,0023	0,0061	0,0037	0,0002	0,0025	0,0061	0,0037
257	835	134,8	0,2233	0,1358	0,0080	0,0920	0,0080	0,0849	0,2233	0,1358	0,0080	0,0920	0,2233	0,1358
835	836	214,1	0,3546	0,2158	0,0127	0,1572	0,0127	0,0785	0,3546	0,2158	0,0127	0,0785	0,0127	0,0936