



VI SEMINÁRIO TÉCNICO DE PROTEÇÃO E CONTROLE

27 de setembro a 02 de outubro de 1998 - NATAL - RN

CO-GERAÇÃO E APLICAÇÃO DE ESQUEMAS DE SEGREGAÇÃO DE GERAÇÃO

Ricardo de Azevedo Dutra FURNAS

Francisco A. Reis F. SEG do Brasil

1. RESUMO

O objetivo deste trabalho é o de apresentar algumas técnicas de proteção relacionadas a sistemas que abrangem uma das promissoras configurações do sistema elétrico brasileiro, qual seja, a topologia de co-geração com auto-produção. Em face das últimas tendências energéticas brasileiras, estamos iniciando uma fase técnica e política de incentivo à co-geração, tornando realidade a figura do auto-produtor. Para uma boa convivência destes sistemas com o sistema elétrico interligado torna-se necessário, ou pelo menos intensamente recomendável, o emprego de determinadas técnicas de proteção para as unidades sincronizadas e para o sistema supridor, além, obviamente das proteções convencionais de unidades geradoras.

2. O QUE É CO-GERAÇÃO ?

Co-geração é a produção combinada de eletricidade e calor obtidos pelo uso seqüencial de energia a partir de um combustível. Usada há algum tempo nas indústrias, a geração simultânea de eletricidade e calor ou vapor em uma única instalação possui vantagens bastante conhecidas.

Existem dois meios mais utilizados de co-geração de calor e eletricidade. No primeiro, conhecido como topping cycle, o calor, com um alto nível de temperatura é usado para gerar eletricidade - por exemplo, um sistema de geração de vapor que se expande em uma turbina, acionando um gerador elétrico (o vapor de baixa pressão é utilizado no processo). Na Segunda possibilidade, conhecida como bottoming cycle, o calor de saída de um processo, com elevado nível de temperatura, é utilizado para gerar energia elétrica - por exemplo, a utilização dos gases de saída de fornos.

3. PORQUE CO-GERAÇÃO ?

Há no mundo um forte interesse e expressivos incentivos à co-geração.

No Brasil, nos últimos três anos, a taxa de crescimento do consumo de energia elétrica registrada ficou na faixa de 5 a 8 %. As previsões do plano de expansão até o ano 2005 estimam um crescimento médio anual do PIB para o período de 5 %, contra um crescimento de 4,9 % do consumo de energia elétrica, o que define uma elasticidade de 0,98, considerada baixa para os padrões brasileiros e internacionais, por não ser compatível com a evolução histórica, com o nível atual de consumo e também com a estrutura do mercado. Ou seja, provavelmente teremos que recorrer a opções "não-convencionais" para o suprimento de energia elétrica - e a co-geração poderá ser uma das opções.

Normalmente, a opção pela co-geração está associada a três requisitos :

- ⇒ demanda energética da indústria (proporção calor-eletricidade, evolução de consumo, etc)
- ⇒ legislação vigente (venda dos excedentes, suprimento quando necessário, etc)
- ⇒ logística de combustíveis (disponibilidade, preços, garantias de fornecimento, etc)

A co-geração não é novidade no Brasil e já é feita, há quase duas décadas, de forma incipiente, dentro da atividade de auto-produção. Depois da criação da possibilidade de venda de excedentes (1981) e com os novos ambientes institucionais (a partir de 1995) estabelecidos legalmente, foram dados novos impulsos a esta atividade. Foi criada a figura do produtor independente e definiu-se um mercado livre para esses novos geradores, consolidado os negócios de energia elétrica.

4. SEGREGAÇÃO DE GERAÇÃO : OS DOIS LADOS DA MESMA MOEDA

Quando convivem na mesma malha de um sistema elétrico interligado, as grandes concessionárias de energia e os auto-produtores, com suas cargas e seus geradores, surgem alguns problemas interessantes no que se refere à preservação de suprimento, mas que são normalmente vistos sob diferentes e antagônicas óticas, pelos dois extremos deste relacionamento (os dois lados da mesma moeda).

A interconexão entre as centrais elétricas de elevada potência e os grandes centros de consumo por meio de extensas redes de transmissão de energia, suscita o problema técnico e econômico de se otimizar a capacidade de transporte das instalações disponíveis em cada momento, mantendo um adequado nível de segurança que permita manter em funcionamento estável do conjunto da rede frente às diversas contingências que podem se apresentar.

Por um lado, o aparecimento de faltas e a conseqüente desconexão de linhas de transmissão assim como a desconexão de grandes blocos de carga, provocam um imediato superávit da força motora sobre os eixos dos geradores devido à redução repentina da potência ativa na saída de seus terminais. Acima de certos níveis este superávit não pode ser controlado pelos reguladores de velocidade, nem admitido na rede, especialmente no caso de geradores hidráulicos cujas massas rotantes podem superar as 1000 toneladas e são acionados por enormes blocos de água.

Nestas condições os geradores afetados serão acelerados pelo efeito do superávit e provocam uma oscilação de potência que poderá levar o sistema a uma perda de estabilidade e sincronismo, cuja conseqüência poderá ser corte de transmissão de energia e déficit de geração para os consumidores, além de alterações de frequência.

A solução mais adequada para este tipo de problema, na ótica das concessionárias, seria a implantação de esquemas de segregação de geração, na tentativa de se manter parte do suprimento e se manter a frequência do sistema em níveis admissíveis.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DE UM ESQUEMA

Em um sistema elétrico em funcionamento estável deve-se cumprir permanentemente a seguinte equação de equilíbrio :

$$P_{gerada} = P_{perdida} + P_{demandada}$$

Uma vez que a demanda varia constantemente, os reguladores de velocidade das máquinas, os dispositivos de regulação de potência e de frequência e a ação operativa devem atuar permanentemente com o objetivo de conservar a igualdade anterior e de manter constante, dentro de certos limites, a frequência do sistema.

Como as unidades geradoras se ligam às demandas através de linhas de transmissão, não só as variações de cargas influem sobre a potência gerada mas também o fazem, e de forma muito importante, a estrutura de rede de conexão. A

título de visualização analisemos o sistema representado pela figura 1 :

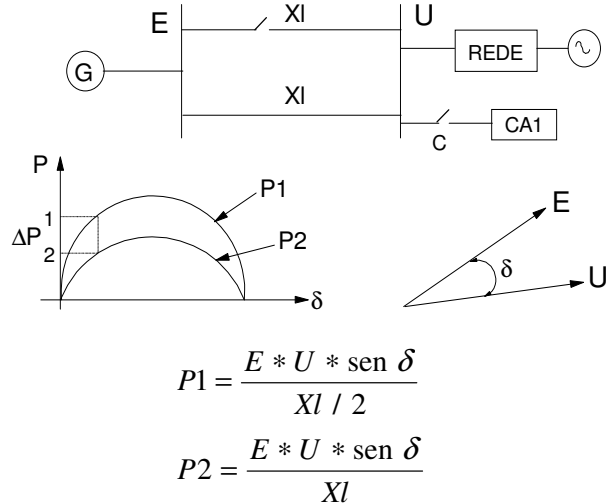


FIGURA 1.: Variação da potência de saída do gerador G por abertura de uma linha ou pela desconexão de parte da carga (CA1).

Pode ser observado que a potência elétrica de saída do gerador G pode variar repentinamente seja pela desconexão de uma parte importante da carga C_g , sobre o qual já mencionamos, mas também pela alteração na topologia da rede de transmissão, que na figura implicará em um descarregamento no gerador de uma potência ΔP (potência acelerante), que na prática, em um grande número de casos não pode ser administrada rapidamente pelos sistema de controle de regulação.

Poder-se ia, a princípio, equacionar quais as alterações na topologia da rede que poderiam provocar estas variações inadmissíveis no parque gerador, e um sistema de monitoração do estado da configuração do sistema, comandariam adequadas segregações das unidades geradoras, preservando sua integridade elétrica. No entanto, como o sistema de transmissão de energia é composto de várias linhas e subestações distribuídas ao longo de grandes regiões, a instalação desta lógica em cada SE exigiria uma grande quantidade de equipamentos de supervisão e de comunicação com as usinas, o que torna estes esquema de operação problemática, difícil e cara.

A solução mais adequada nestes casos é a instalação nas usinas geradoras de dispositivos capazes de detectar rapidamente o degrau de carga, permitindo comandar localmente e automaticamente a segregação de geração, desconectando-os de forma seletiva e possivelmente em vários níveis e configurações. Isto é plenamente possível através de um esquema de proteção de potência que centralize as grandezas de todas as unidades de uma usina e comande as desconexões seletivamente a partir de seleções previamente ajustadas, como pode ser visto no esquema simplificado da figura 2. Algumas medições e simulações digitais indicam, adicionalmente, uma maior sensibilidade

na detecção do problema quando se utiliza associativamente um esquema de proteção de frequência para a função de segregação de geração, na maioria dos casos. Esta seria portanto a proposta mais simples de esquema a ser aplicado sob a ótica da concessionária.

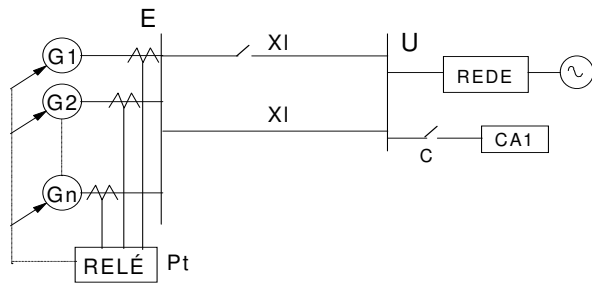


FIGURA 2 : Esquema simplificado de segregação de geração.

4.2. DESACOPLAMENTO DA CO-GERAÇÃO

Em alguns casos a operação paralela de vários geradores pode causar alguns problemas, especialmente quando ocorrem faltas no sistema interligado, mas deve ser garantida o desacoplamento da co-geração automaticamente da malha faltosa, evitando-se com isso danos mecânicos, perdas de sincronismo, sobrecargas proibitivas, reversão de potência, etc. Após a desconexão, a geração própria deve ser mantida como uma ilha independente, para o suprimento de suas cargas.

Se na malha do sistema interligado já é complexo e oneroso se implantar um esquema de comunicação entre as subestações para comandos de segregação após a detecção de faltas, como mencionado no item anterior, pode-se imaginar a dificuldade ainda maior que seria a implantação de esquemas entre a rede concessionária e as instalações de co-geração privados.

Torna-se imprescindível, portanto, o estabelecimento de um critério que permita identificar, localmente, as condições de falta da rede principal que devem levar ao desacoplamento dos co-geradores. A descrição deste processo será abordado nos tópicos seguintes.

5. PROCESSO DE DESACOPLAMENTO

Antes de descrever os critérios propostos, vamos verificar as duas situações mais comuns de desconexão da rede primária :

5.1. DINÂMICA DA DESCONEXÃO DA REDE PRIMÁRIA

A rede primária pode ser desacoplada em duas situações básicas :

5.1.1. Desconexão sem prévia alteração da tensão :

São os casos de abertura manual, disparo por sobrecarga, etc.

Um gerador síncrono que tenha trocado energia com a concessionária por uma linha de conexão muda para operação isolada depois que da abertura do disjuntor (veja Figura. 3). Nestes casos é possível que uma carga residual permaneça no lado do gerador e este continua alimentando esta carga.

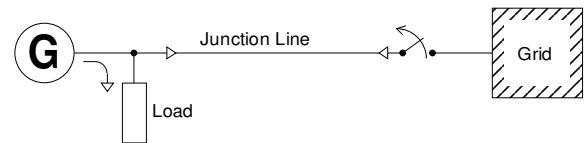


FIGURA 3 : Configuração que precisa da proteção de desacoplamento de rede primária.

Dependendo dos componentes de potência ativa e reativa do sistema isolado, os seguintes comportamentos dinâmicos podem ser previstos :

- Quando a carga de potência ativa aumenta durante a formação do sistema isolado, a velocidade do gerador decresce e também a do sistema isolado. Se menos potência ativa é suprida ao sistema isolado, os valores de velocidade e frequência aumentam proporcionalmente.
- Quando a carga de potência reativa aumenta durante a formação do sistema isolado, a tensão dos terminais do gerador decrescem. Se menos potência reativa é suprida, a tensão terminal aumenta proporcionalmente.
- Quando o carregamento do gerador aumenta através das potências ativa e reativa durante a formação do sistema isolado, o vetor de tensão do gerador e por este o da malha residual cai imediatamente em poucos ciclos. Quando o gerador fica sem carga, o vetor de tensão avança proporcionalmente.
- Mesmo após o "salto" o vetor de tensão se mantém mudando sua posição de acordo com o comportamento da frequência. Se a carga é aumentada depois, o vetor cai ainda mais a avança cada vez mais ao descarregamento.

Estas regras são válidas para o período transitório na faixa de 10-300 mseg após a falta da rede primária em sistemas convencionais. Somente após este tempo a velocidade/frequência ou tensão do gerador sofre influência dos reguladores. Atenção especial deve ser dada a sistemas de controle com velocidade muito alta, que merecem porisso critérios especiais de tratamento.

5.1.2. Desconexão após prévia alteração da tensão :

São os casos de curto-circuito com ou sem religamento automático, ruptura de condutor, etc.

A intenção é que a rede primária seja desacoplada imediatamente após um curto-circuito (isso se aplica especialmente em sistemas com linhas que são providas com recursos de religamento automático), o transitório para

o gerador é um curto-circuito seguido de rápido isolamento (Figura 4).

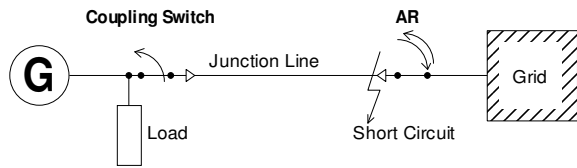


FIGURA 4 : Formação de um sistema isolado por um curto-circuito e religamento automático.

Durante a primeira fase da falta na rede primária a tensão nos terminais do gerador despenca de acordo com a relação de impedância. Devido ao ângulo altamente indutivo do curto-circuito da linha, a tensão nos terminais do gerador se torna altamente indutiva também. Isto agora resulta em avançar o reduzido vetor de tensão. Devido à potência ativa do gerador decrescer ao mesmo tempo, a velocidade aumenta ligeiramente e o vetor de tensão avança ainda mais.

Pela abertura do disjuntor a falta da rede entra na Segunda fase onde a seção faltosa da linha é desconectada do gerador e da carga remanescente. Somente agora a tensão recupera e no geral a força dinâmica é similar àquela descrita anteriormente, condicionada aos componentes de potência ativa e reativa no sistema isolado. Também quando a rede é tão rapidamente desacoplada quanto neste caso, pode ser suposto que a dinâmica de desacoplamento da rede primária progride sem influência até a velocidade/frequência ou tensão serem controladas pelos reguladores.

5.2. CRITÉRIOS DE DESACOPLAMENTO

Os critérios de desacoplamento convencionais são :

- Tensão ($U<$, $U>$)
- Desbalanço de tensão
- Potência reversa (P_{inv})
- Frequência ($f<$, $f>$)
- Variação de carga (ΔP)
- Sobrecorrente e subtensão ($I>$ & $U<$)
- Sobrecorrente direcional ($I>\rightarrow$ & $U<$)
- Subfrequência e subtensão ($f<$ & $U<$)

Alguns destes critérios tem desvantagens pelo fato de serem aplicáveis somente em algumas configurações de rede, ou pelo fato de terem de ser temporizados para evitar falso disparo. Assim a chave é achar a combinação adequada de critérios para uma configuração especial.

5.2.1. Taxa de variação de frequência (df / dt)

Quando se mede a taxa de variação da frequência, não se está medindo a frequência existente momentaneamente, mas sim a razão na qual a frequência varia (df / dt). Assim a tendência pode ser detectada antes que a frequência tenha mudada para um nível que seja acima de um valor limite.

Adicionalmente ao valor de frequência medido real, um relé df/dt deve ser usado para que os valores prévios possam ser considerados e por eles a tendência da variação de frequência possa ser analisada.

Há duas exigências diferentes em uma análise de tendência de frequência:

- Disparo rápido
- Segurança contra disparos indevidos

Para se alcançar mais segurança contra disparos indevidos, a frequência deve ser observada por algum tempo (vários intervalos de medição) levando o disparo a ser retardado.

Operações de chaveamento na rede primária, entretanto, podem apresentar alguns cruzamentos por zero e assim distorcer duas alterações de frequência contrárias com o efeito de por exemplo, o primeiro ciclo é medido muito curto e o seguinte medido muito longo ; a frequência aumentando seguida por uma diminuindo é detectada pelos relés. Como precaução contra disparos, o relé contudo deve avaliar a direção a mudança de frequência e sua continuidade. Este requisito é encontrado nos relés de proteção digitais e extensos algoritmos são utilizados para se eliminar o ruído de faltas medidas nos valores medidos de frequência. Uma variação de, por exemplo, 1 Hz/Seg causa a duração do ciclo se alterar cerca de 4 μ seg por ciclo. Como comparação : a duração de um ciclo normal em 60 Hz é de 17 msec. A diferença requer uma alta precisão no relé de forma que estas variações de frequência possam ser reconhecidas com precisão suficiente.

Um problema diferente é como definir o valor correto de disparo. Quando considerando o mais rápido tempo de disparo possível em máxima segurança contra condições de disparo, a arquitetura da rede primária deve ser levada em consideração. Não somente o supridor de potência mas também os consumidores tem influência na extensão de variações de frequência.

Os parâmetros de influência são :

- Tipo de controle
- Tipo de consumidor (os próprios e os da malha)
- Tipo de operações de chaveamento

Na figura 5 a seguir um comportamento de frequência típico após parada da rede primária é mostrado. Antes da parada o sistema isolado era suprido pela rede pública parcialmente. Primeiramente a velocidade do gerador decresce constantemente porque o gerador tem adicionalmente que suprir os consumidores principais. Depois o regulador intervém e tenta corrigir a queda de velocidade.

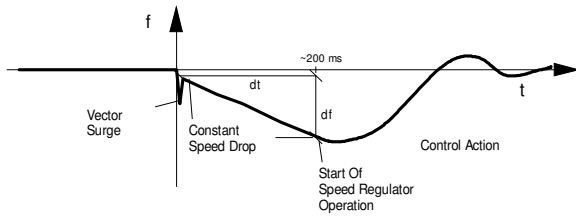


FIGURA 5 : Comportamento de frequência após parada da rede primária.

5.2.2. Salto de Vetor (Vector Surge)

O princípio pode ser explicado com base em um gerador síncrono normal (figura 6) que consiste em uma tensão interna U_p e reatância principal X_g ; Z_L representa os consumidores conectados. Pelo disjuntor S a falta na rede primária é simulada em $t = 0$.

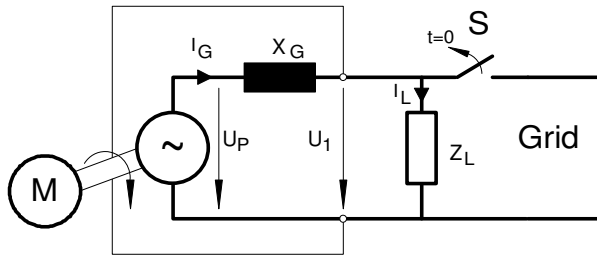


FIGURA 6 : Diagrama de simulação de circuito.

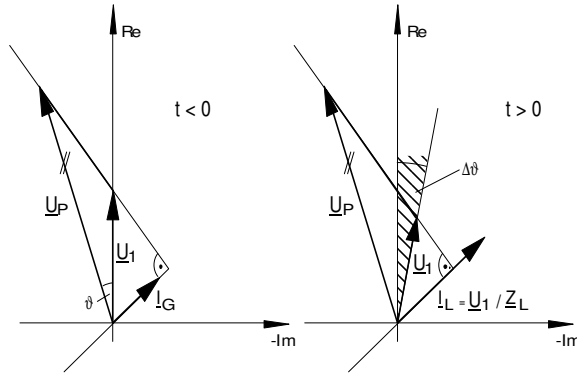


FIGURA 7 : Diagramas de fasores.

O ângulo de deslocamento do rotor ν é o ângulo entre a tensão interna e a tensão do terminal do gerador U_1 .

No caso da saída de potência nos terminais do gerador, uma diferença angular entre a tensão terminal U_1 e a tensão interna U_p se desenvolve devido a reatância X_g (figura 7, $t < 0$). Este ângulo é chamado ângulo de deslocamento do rotor.

Antes do desacoplamento o consumidor Z_L é parcialmente alimentado pela rede primária e parcialmente pelo gerador próprio.

No exemplo seguinte é suposto que a potência suprida à carga não está somente sendo importada do gerador mas também da rede primária. Se o suprimento da rede é interrompido ($t > 0$), a potência adicional repentinamente importada do gerador é equivalente à quantidade previamente importada da rede primária. Devido à sua inércia, o rotor não irá mudar sua velocidade abruptamente. Portanto, inicialmente a tensão interna não varia. O ângulo de deslocamento do rotor é alterado pela variação da corrente $I_g \rightarrow I_L$ e assim o ângulo de fase da tensão terminal não é mais definido pela rede primária mas pelo ângulo da carga do sistema isolado.

A variação de ângulo acontece muito rápido e outros efeitos desta variação de carga (queda de velocidade) alcançam relativo a isto quantidades mensuráveis somente após algum tempo.

Como pode ser visto na figura 8, a tensão do terminal do gerador U_1 pula para um diferente valor instantâneo.

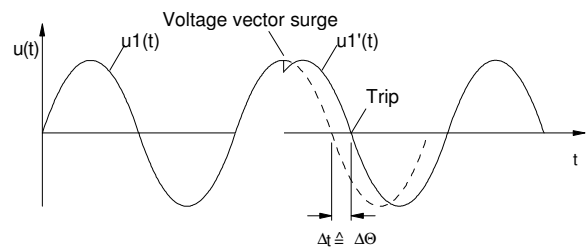


FIGURA 8 : Oscilograma da tensão terminal do gerador no instante em que a rede primária é desligada.

Devido a isto a próxima e também a seguinte passagem pelo zero ocorrem em um tempo diferente do esperado.

Conseqüentemente a medição do tempo entre as passagens pelo zero da tensão é a forma mais confiável para os dispositivos de proteção detectar uma variação angular. Para definir o momento em que isso vai acontecer, o relé precisa de uma referência interna. Processos mais lentos, tais como variações de frequência e tensão não devem causar disparos não intencionais. Conseqüentemente é essencial que a referência seja sempre ajustada para a frequência real da rede primária. Uma diferença de tempo medida Δt é proporcional a uma variação angular $\Delta \theta$ ocorrida. O relé dispara se o valor de ajuste for excedido.

A supervisão de Salto de Vetor é um princípio muito satisfatório para rápido desacoplamento de rede primária. Pela utilização deste método tempos de disparo de cerca de 20 mseg (sem o tempo de abertura do disjuntor) são possíveis.

6. CONCLUSÃO

Na realidade atual de configuração do sistema elétrico brasileiro, extremamente malhado, com usinas distantes dos centros de carga, e com sistemas de co-geração distribuídos ao longo da rede, torna-se muito importante que sejam

analisados, estudados e implementados todos os esquemas de proteção para controle de emergências que forem possíveis, com o objetivo de preservação dos equipamentos utilizados e essencialmente, a conservação ótima de suprimento dos consumidores.

Nos sistemas com geradores operando em paralelo com a rede primária é primordial que eles sejam desacoplados rapidamente da malha, no caso de faltas da rede. A faixa de tempo de interesse é da ordem de 200 mseg após a falta para se garantir que o processo de desacoplamento seja rápido o suficiente nos casos de religamento automático.

Alguns dos critérios convencionais de proteção não são sempre aplicáveis porque as faltas de rede não são detectados com a rapidez necessária para eles. Porisso o trabalho recomenda a análise de aplicação do método da taxa de variação da frequência (df/dt) associado ao salto de vetor, quando a maioria dos casos de faltas podem ser cobertas. Relés de proteção apropriados para esta função estão disponíveis e foram especialmente projetados para realizar rápido desacoplamento da rede primária. É necessário o conhecimento dos dados de sistema e os relacionados ao consumidor para o desenvolvimento dos cálculos de parametrização das proteções adequadamente.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] STEFAN BAUSCHKE, H.WEUREND; FRANCISCO A. REIS F.. Loss of Mains Protection using enhanced combinations of protection criteria - SEG
- [2] MANUELE, CARLOS OSCAR ; Dispositivo para Desconexión Automática de Generadores - CTM - Salto Grande .
- [3] NASCIMENTO, JOSÉ GUILHERME ^a; A Co-geração no Brasil : situação atual e possibilidades futuras - Revista EM -janeiro/97.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Preparo e apresentação de normas brasileiras, NBR 6822. Brasil.