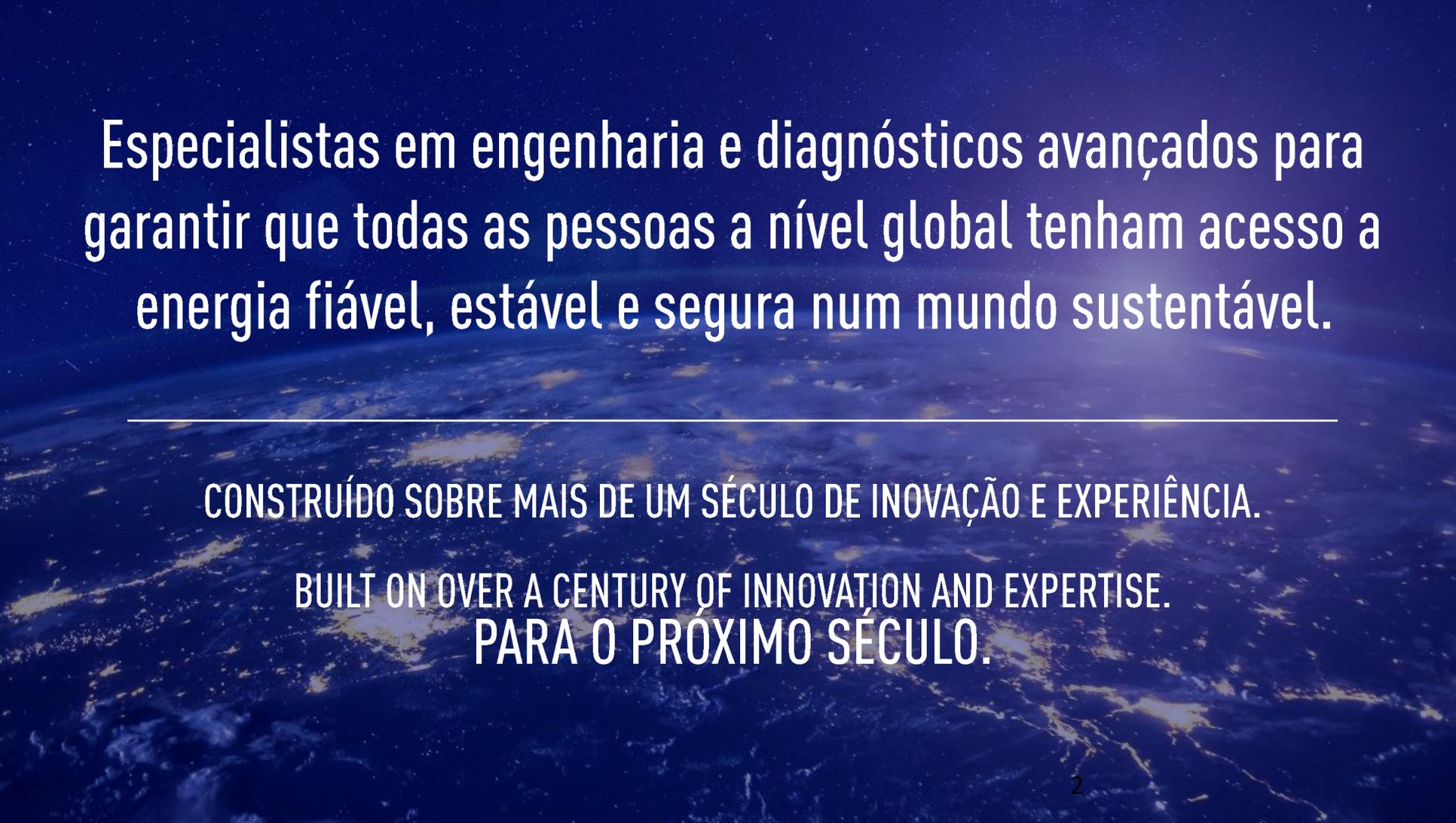


# Benefícios de um programa de análises ao óleo para avaliação de equipamentos elétricos

Filipe Cunha, Transformer Design Engineer



©2024 Doble Engineering. All Rights Reserved.



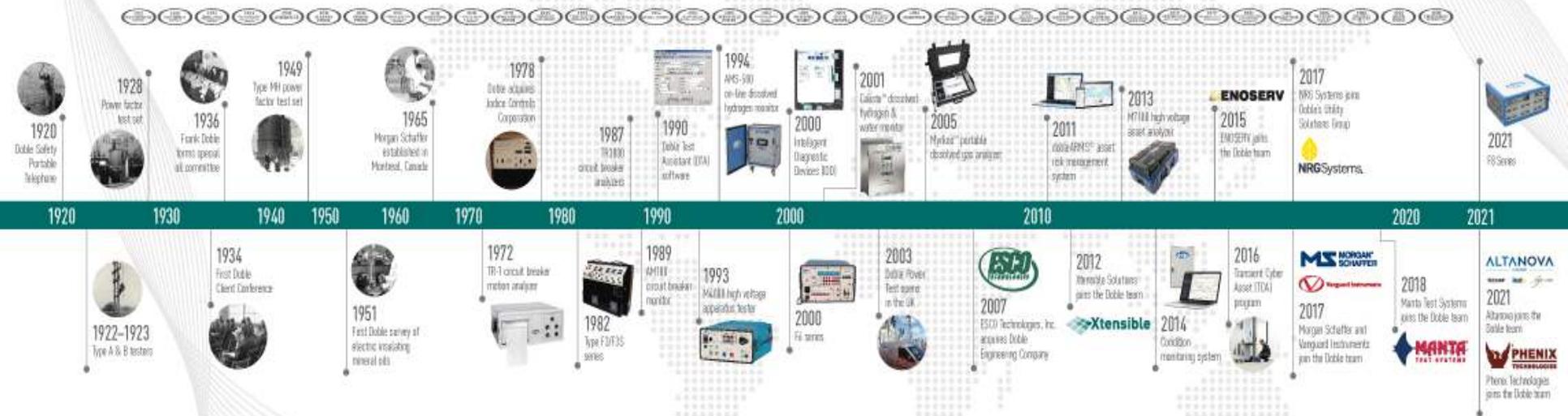
Especialistas em engenharia e diagnósticos avançados para garantir que todas as pessoas a nível global tenham acesso a energia fiável, estável e segura num mundo sustentável.

---

CONSTRUÍDO SOBRE MAIS DE UM SÉCULO DE INOVAÇÃO E EXPERIÊNCIA.

BUILT ON OVER A CENTURY OF INNOVATION AND EXPERTISE.  
PARA O PRÓXIMO SÉCULO.

# 100 YEARS OF SERVICE TO THE ELECTRIC UTILITY INDUSTRY



# DOBLE TODAY



**110**  
COUNTRIES



**12**  
GLOBAL  
OFFICE  
LOCATIONS



**800+**  
EMPLOYEES



**5,550+**  
CUSTOMERS GLOBALLY



Part of ESCO  
Technologies' Utility  
Solutions Group

## OUR BRANDS



# FIABILIDADE EM TEMPOS DE MUDANÇA



- Transição para energia limpa
- Procura crescente de eletricidade
- Renováveis e produção dispersa
- Evolução de requisitos regulatórios e cyber-segurança
- Atualizar-se com a IoT
- Inteligência Artificial e tecnologias emergentes

De olhos postos no futuro, Doble ajuda as empresas a navegar pela mudança, tal como fizemos nos últimos 100 anos.

# OTIMIZA A PERFORMANCE COM PRODUTOS E SOLUÇÕES DOBLE



- Monitorização
- Gestão de ativos
- Testes de proteção
- Avaliação e testes fora de serviço
- Serviços de consultoria e ensaios
- Avaliação e testes em serviço
- Segurança e conformidade
- Normativas do óleo



# Agenda

Este webinar proporcionará uma visão geral dos seguintes tópicos:

- Gases dissolvidos no óleo
- Porque é que é importante avaliar a humidade do sistema de isolamento
- Testes para avaliar o estado do papel e cartão isolante
- Casos de estudo
- Questões e respostas



# O porquê de medir os gases do óleo

- Diagnóstico mais importante da indústria
- Excelentes indicadores de potenciais falhas
- Deteta uma ampla variedade de condições
- Sensível aos primeiros sinais de falhas em desenvolvimento
- Proporciona informação dos materiais envolvidos na falha
- Proporciona uma indicação da gravidade e da necessidade de ações corretivas
- No entanto, pode ser complexo. A análise não é simples em todos os casos.

# DGA - Falhas e problemas comuns

Descargas  
Parciais

Pirólise do  
papel

Térmicos  
Baixa Temperatura

Térmicos  
Alta Temperatura

Potencial  
flutuante

Arcos  
elétricos

Deteção  
de fugas  
de gas

Gases  
dispersos

Desgaseificação -  
Passivador

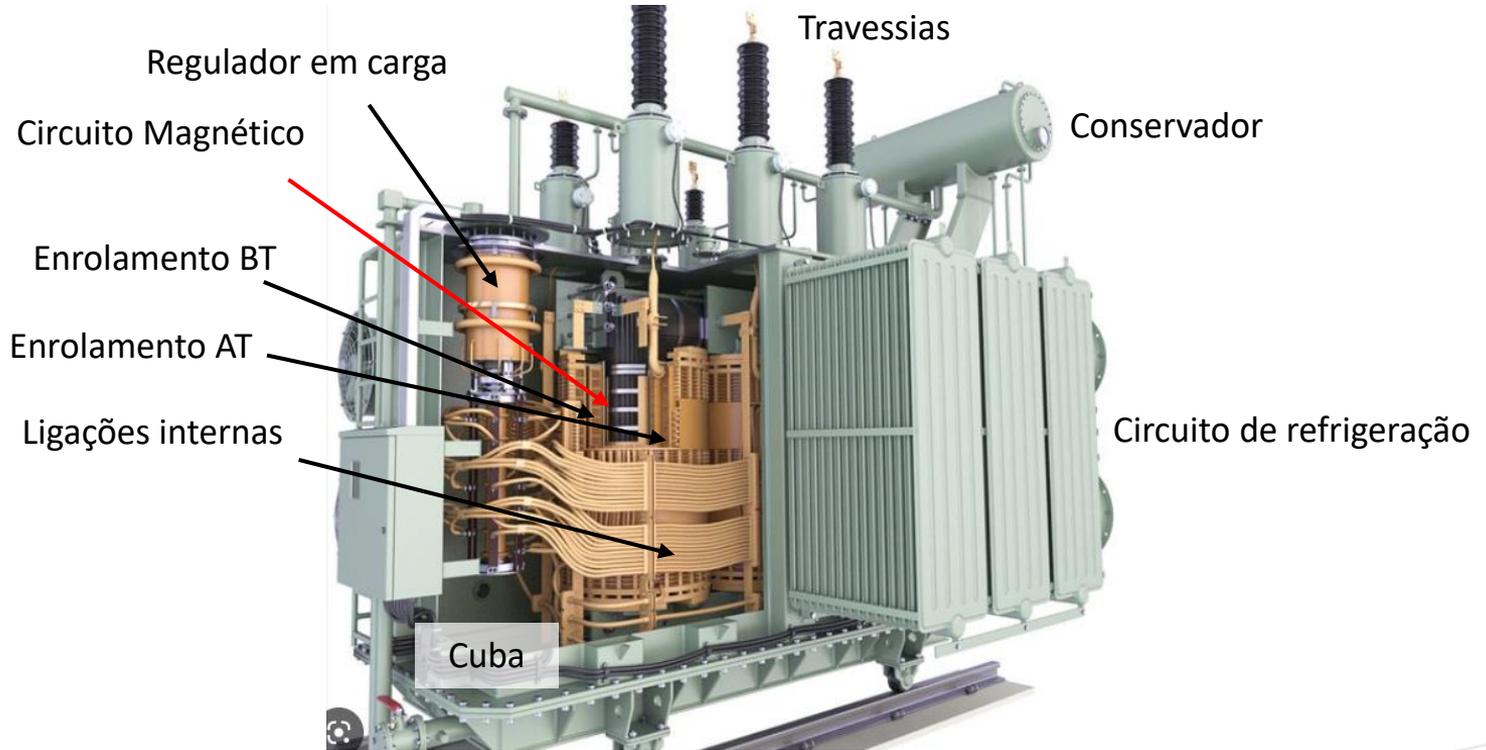
Balão e/ou juntas  
comprometidas

Fuga no regulador  
de tomadas

Contaminação

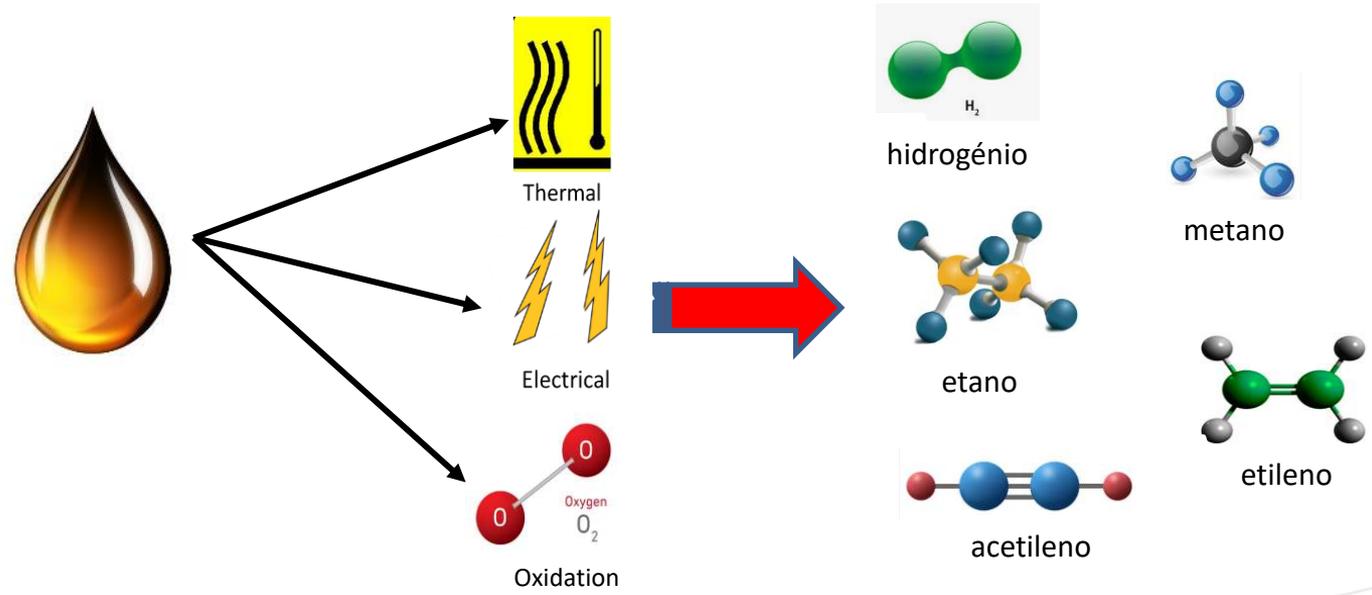
# Transformador: os materiais podem provocar a formação de gases

- Aço
- Pintura
- Juntas
- Vernizes
- Colas
- Óleos
- Fibra de vidro
- Papel
- Fenólicos
- Cobre
- Alumínio
- Latão
- Aço inoxidável
- Soldaduras





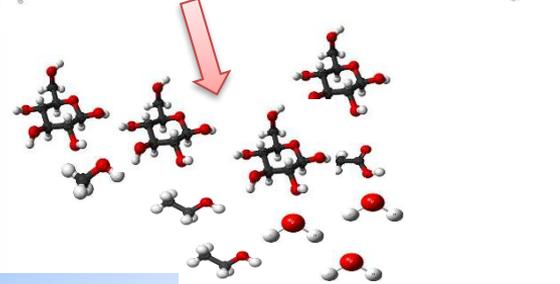
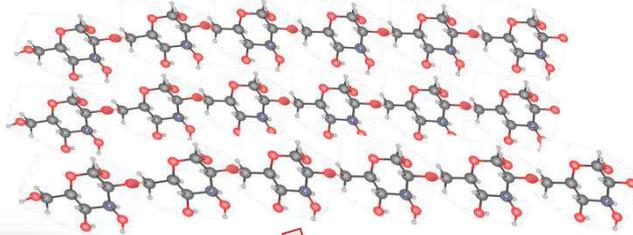
# Formação de gases – Líquidos Isolantes



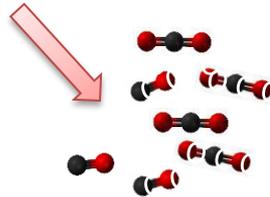
# Gases gerados pela decomposição do papel



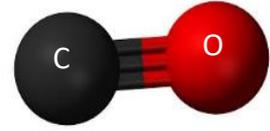
Celulose – Glucose



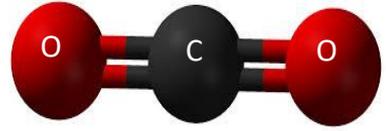
Rutura a C5s e inferiores



Rutura a óxidos de carbono



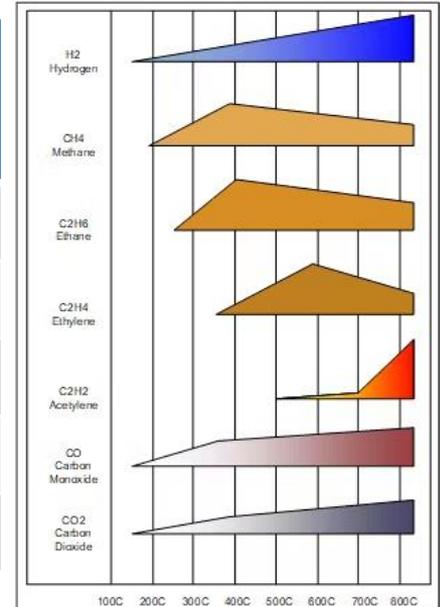
Monóxido de Carbono



Dióxido de Carbono

# Formação de gases: óleo mineral

Temperatura °C	Gases Formados	Símbolo	Energia Requerida kJ/mole
~120 ↓ >700	Hidrogénio	H <sub>2</sub>	338
	Metano	CH <sub>4</sub>	338
	Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	607
	Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	720
	Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	960



<https://www.tdworld.com/test-and-measurement/article/20972772/building-a-transformer-health-index-part-2>

# Perfis de temperatura

Gases	Aquecimento do óleo
Metano e/ou Etano algumas vezes Hidrogénio	Baixa temperatura, <300°C
Etileno (principalmente)	300 to 700°C
Etileno com Acetileno	Ponto quente >700°C

# Gases Combustíveis e Não-Combustíveis

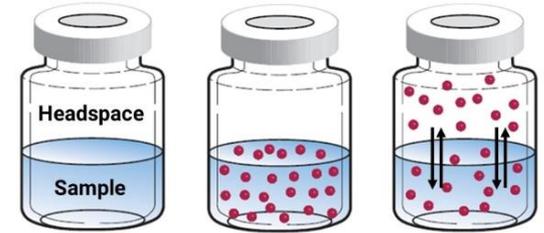
Gases Combustíveis	Símbolo	TGC
Hidrogénio	H <sub>2</sub>	<b>TGC = Total Gases Combustíveis ppm (partes por milhão)</b>  <b>H<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub> + CO + C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> + C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> + C<sub>2</sub>H<sub>2</sub></b>
Metano	CH <sub>4</sub>	
Monóxido de Carbono	CO	
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	
Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	

Gases Não-Combustíveis	Símbolo
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>
Oxigénio	O <sub>2</sub>
Nitrogénio	N <sub>2</sub>

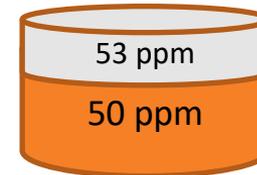


# Coeficientes de partição (Base para o método C)

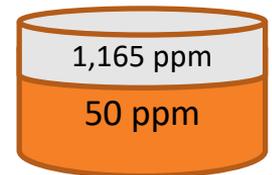
Gás	Coeficiente de Ostwald
Oxigénio	0.138
Nitrogénio	0.0745
Dióxido de Carbono	0.900
Monóxido de Carbono	0.102
Hidrogénio	0.0429
Metano	0.337
Etano	1.99
Etileno	1.35
Acetileno	0.938



Acetileno



Hidrogénio





# Interpretação dos dados de DGA



- Normas – O que é uma Quantidade Normal?
- Guia para a quantidade total dos gases combustíveis
- Gases chave – Identificação do tipo de problema
- Relações – Identificação do tipo de problema (Rogers, IEC 60599, outros)
- Tendências – O que há de novo?
- Impressões digitais – Comportamento típico gasificação em certos transformadores
- Isolamento sólido – estará o papel ou outros material à base de celulose envolvido?
- Gases disperses – Será que este problema é sensível ao aquecimento do óleo?
- Triângulo de Duval e Pentágonos
- Índices de Energia Normalizados - IEN



# Interpretação dos dados de DGA



- Chapa de características e idade
- Tendências nos dados históricos
- A quantidade total dos gases combustíveis subiu repentinamente?
- Qual a condição de carga do transformador?
- O óleo foi tratado?
- Alguma travessia, ou o transformador falhou?
- Em caso de reparação, o óleo foi filtrado e tratado?

# Limites para gases dissolvidos – Várias fontes



Fontes	H <sub>2</sub>	CO	Metano	Etano	Etileno	Acetileno	CO <sub>2</sub>	TCG
DOBLE	100	250	100	60	100	5 (1)*	10,000-core** 20,000-shell**	610
IEEE C57.104 <sup>+</sup> O <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> ≤ 0.2 O <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> > 0.2 (2019)	200 90	1100 600	100-200 30-60	70-250 30-40	40-175 80-125	2-4 7	7000-14000 7000-8000	
IEC 60599 (intervalos)	50-150	400- 600	30-130	20-90	60-280	2-20 (sem LTC) 60-280 (com LTC)	3800-14,000	

Valores baseados em normas estatísticas ou Valores consensuais.

\* Considera-se valores de 1ppm ou maiores de acetileno como anormais para avaliação adicional.

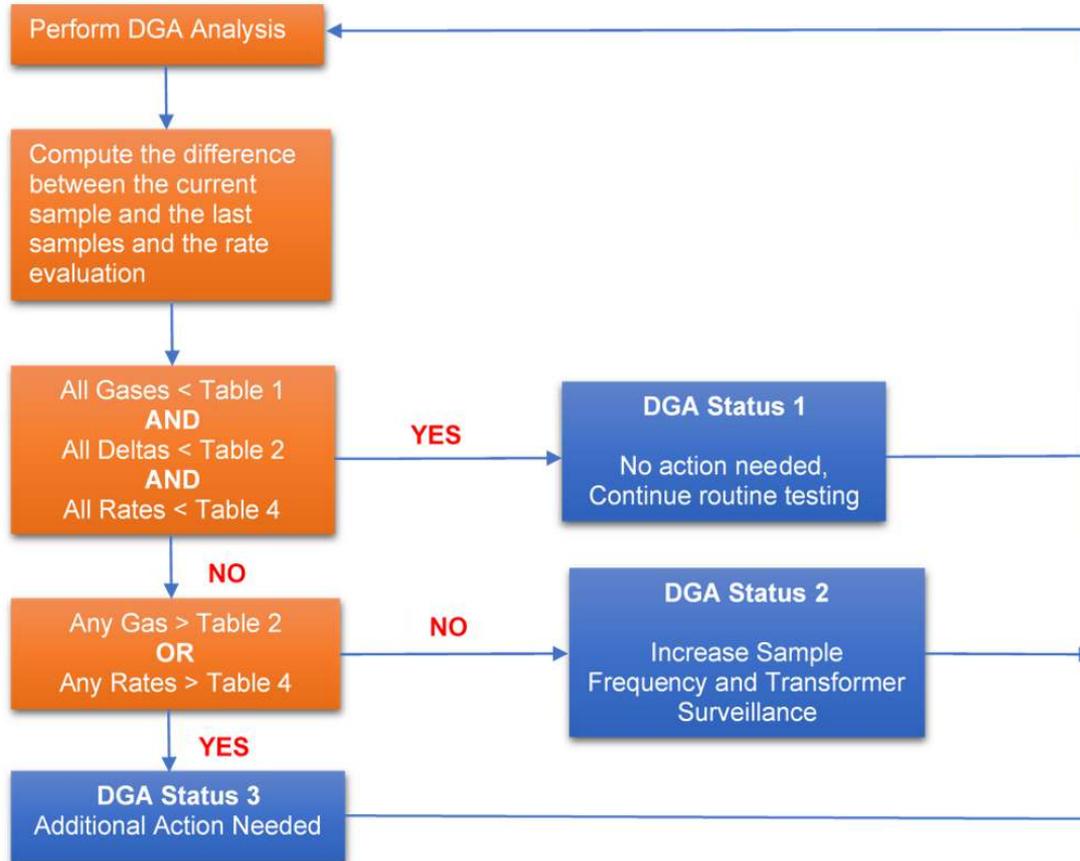
\*\* Valores de referência empíricos.

+IEEE de 2019 - Percentis de 95ª ordem abrangem transformadores de várias idades.

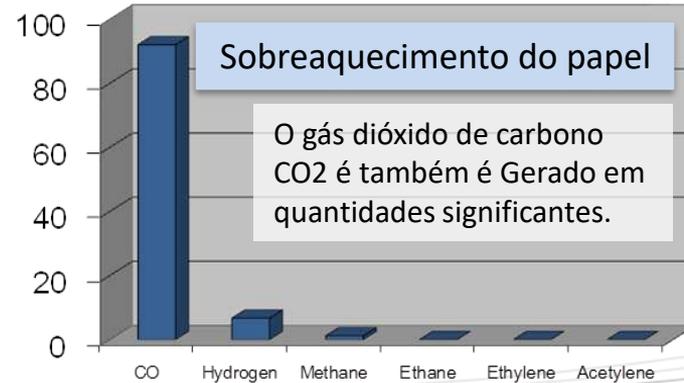
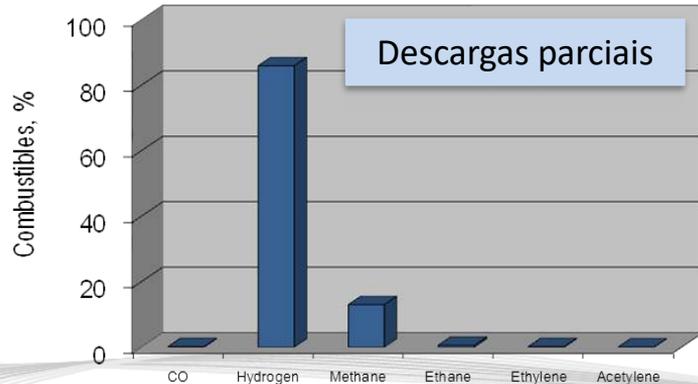
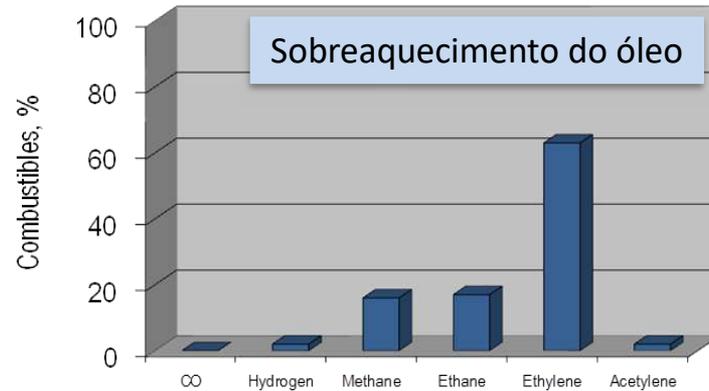
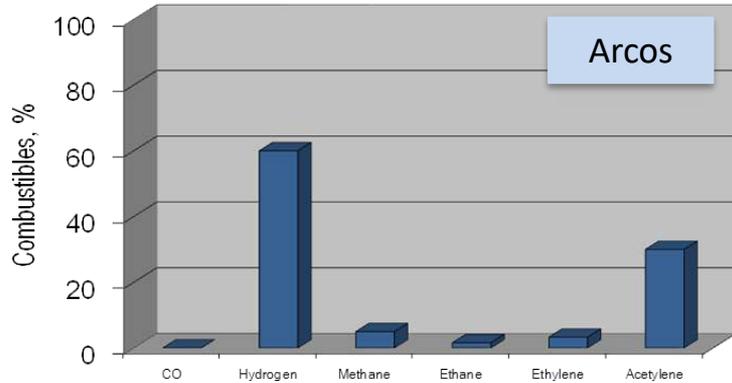
# IEEE C57.104 2019

Estado	Definição
DGA Estado 1	Resultados DGA aceitáveis. - Continuar com operação normal.
DGA Estado 2	Produção de gases incipiente ou modesta, ou nível de gases moderadamente elevado. - Recolher nova amostra para confirmar e monitorizar a evolução dos gases.
DGA Estado 3	Níveis de gases elevados ou produção contínua e significativa de gases. - Ações de mitigação e/ou outras respostas devem ser consideradas. Monitorização contínua.

# Fluxograma - IEEE C57.104 2019



# Gases chaves



# Óxidos de carbono e proporções



- Isolamento à base de celulose
- Tipo Shell > CO<sub>2</sub> do que tipo Core
- CO<sub>2</sub> acidental
- Relação CO<sub>2</sub>/CO próxima de 1 = falha de alta temperatura
- Nível alto de CO<sub>2</sub> e baixo de CO = falta de capacidade de refrigeração – sobreaquecimento generalizado
- Relação CO<sub>2</sub>/CO com tendência decrescente = sobreaquecimento do papel



# Caso de estudio – DGA



# Problemas após rebobinagem em fábrica

- Transformador de transmissão 115kV da General Electric, de 1992
- Enrolamentos reconstruídos após descarga ter danificado a baixa tensão da fase C
- Transformador passou todos os ensaios pós reparação
- Transformador energizado e em operação a cerca de 50% da carga durante um ano

# Problemas após rebobinagem em fábrica



Gases dissolvidos no óleo	Depois da falha e antes da reparação, ppm	Depois da reparação, ppm	1 ano após reparação, ppm
Hidrogénio	151	0	26
Metano	23	0	74
Monóxido de Carbono	394	3.0	84
Etano	5.8	0	30
Dióxido de Carbono	4740	53	466
Etileno	6.9	0	99
Acetileno	7.3	0	Vestígios

# Aumento dos valores de Etileno

- Transformador colocado em monitorização, com amostragem do óleo bimensal.
- Tendência crescente de Etileno

Sample Date	Hydrogen	Oxygen	Nitrogen	Methane	Carbon Monoxide	Ethane	Carbon Dioxide	Ethylene	Acetylene
08/14/2017	0	3700	12300	0	3.0	0	53	0	0
07/10/2018	20	7,070	73,900	64	64	28	385	95	0
08/14/2018	26	6,010	78,600	74	84	30	466	99	Trace
08/30/2018	24	6,810	81,400	75	81	32	513	103	Trace
09/14/2018	24	5,770	75,800	77	83	34	540	107	Trace
09/28/2018	25	9,980	95,600	82	92	36	568	114	0
10/16/2018	25	5,120	77,400	82	92	35	543	111	Trace

# Problemas após rebobinagem em fábrica

- Extremidades da laminação dobraram e encostaram à cuba
  - Faltaram espaçadores de cartão prensado
- Aumento do gás Etileno como consequência de correntes de circulação não desejadas

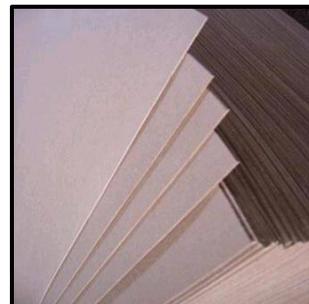


# O porquê da importância de monitorizar a humidade do sistema de isolamento



# Onde está localizada a água

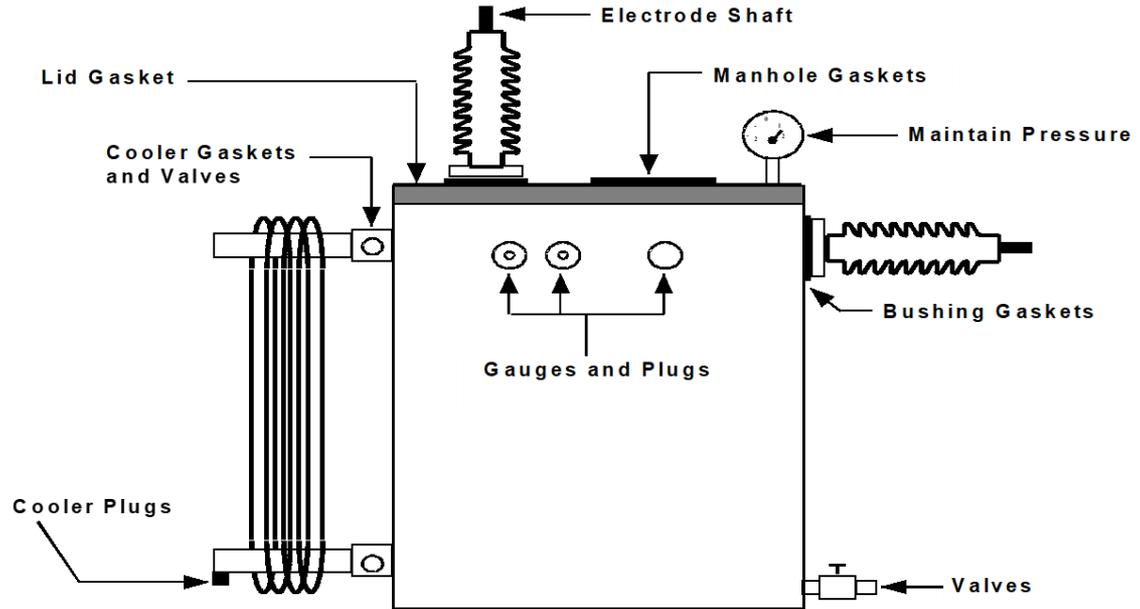
- A maior parte está localizada no isolamento sólido de base celulósica
  - Madeiras
  - Papel isolante
  - Papel prensado
- A quantidade no óleo tipicamente representa <1% do total



## Pontos de entrada de água em Transformadores

- Residual, após processamento do óleo:
  - Fabrico
  - Instalação
  - Manutenção
- Fugas
  - Pontos fracos no transformador
- Sistema de preservação
  - Secadores ineficazes – conservadores de ar livre
  - Rutura do balão/diafragma – conservadores selados
- Subproduto da decomposição da celulose

# Pontos de entrada de água em Transformadores



# Qual a importância da água

- Permeabilidade elétrica varia com a quantidade de água
  - A rigidez dielétrica diminuiu com o aumento de água
  - O sistema de isolamento torna-se mais vulnerável com o aumento de água
- A taxa de envelhecimento do papel é diretamente proporcional à quantidade de água
- Condiciona o risco de formação de bolhas durante sobrecargas
- Aumenta o risco de condensação durante o arrefecimento

# Solubilidade

- Solubilidade (100% de saturação) da água em óleo é definida pela quantidade de água dissolvida que um óleo pode reter a uma temperatura específica.
- Solubilidade altera significativamente com a temperatura
- À medida que a temperatura do óleo aumenta, também aumenta a sua capacidade de reter água.
- Por exemplo, a solubilidade da água em óleo a 10°C é cerca de 33ppm, enquanto que a 90mg/kg é de 592mg/kg.
- À medida que os óleos envelhecem e acumulam grandes quantidades de ácidos e outros compostos, aumenta a solubilidade.

# Solubilidade da água em líquidos isolantes - ppm

Temp, °C	Óleo Mineral	Silicone	Askarel	Ester natural	Ester sintético
0	22	88	43	631	1207
10	36	125	63	787	1452
20	55	174	91	966	1726
30	83	237	127	1171	2028
40	122	316	175	1402	2358
50	174	414	236	1661	2717
60	243	533	313	1948	3104
70	333	678	408	2263	3518
80	448	849	523	2607	3960
90	594	1051	662	2981	4428
100	775	1286	827	3385	4921

# Por exemplo

- Uma amostra de óleo foi recolhida:
  - Temperatura do óleo superior: 85°C
  - Conteúdo de água: 30 ppm
- Para se determinar a saturação relativa:
  - Água medida (30 ppm)
  - Divide-se pelo nível de solubilidade a 85°C (517 ppm)
  - Expressa-se em percentagem: x100 (%)

$$\text{Saturação relativa (SR)} = \left( \frac{30}{517} \right) \times 100\% = 5.8\%$$

# Óleo com baixa e alta SR%

Quantidade de água: 30 ppm  
Temperatura: 50°C

Quantidade de água: 30 ppm  
Temperatura: 0°C



**Baixa SR**

**Aparência transparente**

**Alta SR**

**Aparência turva**

# Rigidez dielétrica

Substancialmente baixa quando:

- Quantidade de água no papel/cartão aumenta 2 a 4%
- A tensão de rutura do líquido dielétrico reduz proporcionalmente coma saturação relativa da água
  - A tensão de rutura reduz cerca de 50% quando a SR ronda os 50%

# Condensação

- Período de arrefecimento após transitório elétrico
  - A água migra do papel para o óleo, com aumento de temperatura (devido à carga e temperatura ambiente).
  - A altas temperaturas, a migração da humidade é mais rápida e a solubilidade da água no óleo é elevada.
  - Durante o arrefecimento, a água permanece maioritariamente no óleo durante um período longo... a solubilidade também é reduzida.
  - Água em excesso → Alta SR → Baixa tensão de rutura do líquido
  - Possível condensação

## Excesso de água no óleo

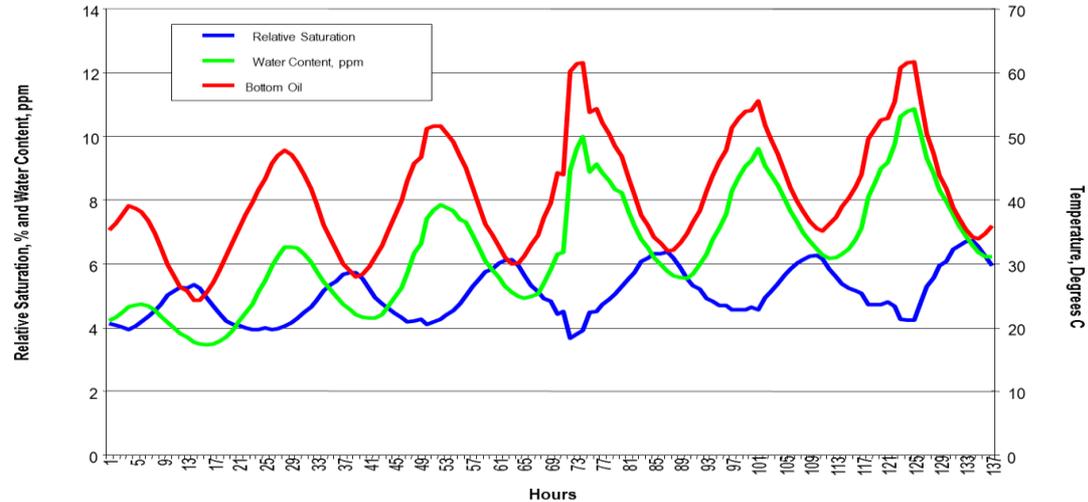
- Período de arrefecimento do transitório elétrico

- Mais suscetível em transformadores que:
  - Estão mais húmidos ( $> 1.5\%$  no papel)
  - Ciclo de temperatura
  - Ciclo de temperatura rápido e em grandes extremos
  - Operação a temperaturas mais baixas



# Medição contínua num transformador

- Quantidade de água não é estática
- Varia com determinadas condições
- Necessita de uma monitorização contínua



A rigidez dielétrica de um líquido isolante correlaciona-se bem com a saturação relativa, em comparação com os níveis de concentração em ppm.

# Testes para avaliar a condição do isolamento do papel e cartão prensado

# Materiais isolantes

- Principais componentes isolantes:
  - Papel
  - Óleo mineral
- Fatores de envelhecimento:
  - Calor
  - Água
  - Oxigénio

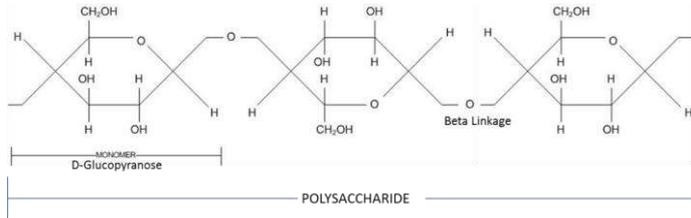
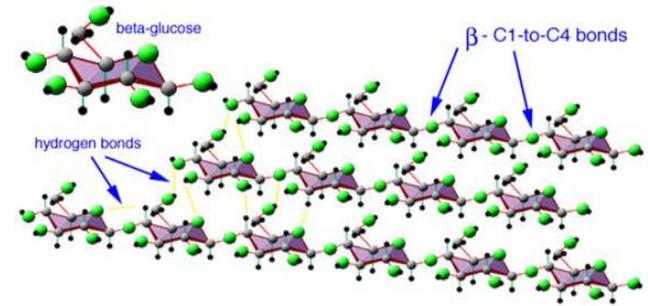
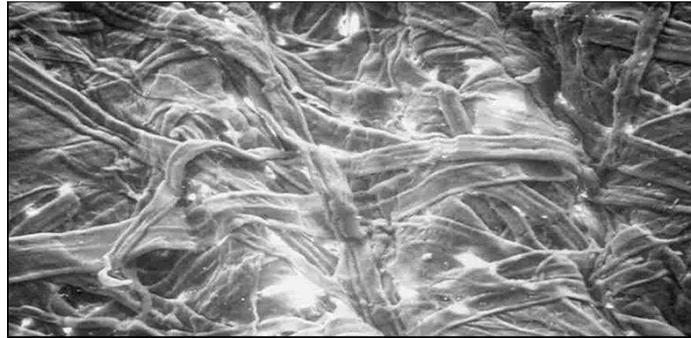
- Controlar fatores para reduzir envelhecimento
- Influencia distinta do papel e do óleo
- Papel como componente mais crítico
- Óleo e substituído mais facilmente

# Celulose

- Um transformadores desenhados para durar 20 anos, muitos deles >30 anos
- Celulose
  - Disponibilidade e preço
  - Retém propriedades isolantes quando se deteriora
  - Moldável
- Tipicamente excedem os 40 anos de vida
  - Se transformadores selados operam à carga nominal ou inferior
- Causas de envelhecimento da celulose
  - Altas temperaturas
  - Água
  - Oxigénio
  - Catalisadores de cobre, contaminantes



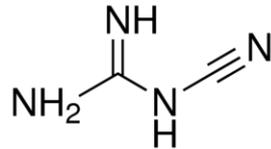
# Celulose – Estrutura Química



- Comprimento médio da cadeia: 1000 to 1300 unidades
- Envelhecimento conduz a cadeias de celulose mais curtas

# Características de envelhecimento do papel

- Termicamente instável
  - Cada aumento de 6-8°C, metade da vida útil
  - Cinética do tipo Arrhenius
    - $K_0 = Ae^{B/T}$
  - Papel termo estabilizado (TU) é mais estável que o papel Kraft convencional



Temperatura °C	Tempo de vida até DP200, TU Kraft (anos)	Tempo de vida até DP200, Kraft (anos)
40	110,838	22,918
60	6,229	1,291
80	485	101
90	151	31
100	50	10
110	17	3,6
140	1	0,2
180	0,04	0,01

# Características de envelhecimento do papel

## Água

- Efeito significativo
- Taxa de deterioração  $\alpha$  conteúdo de água
  - 0.5% to 1.0%: vida média
- Papel termo estabilizado (TU) é mais estável que o papel Kraft convencional

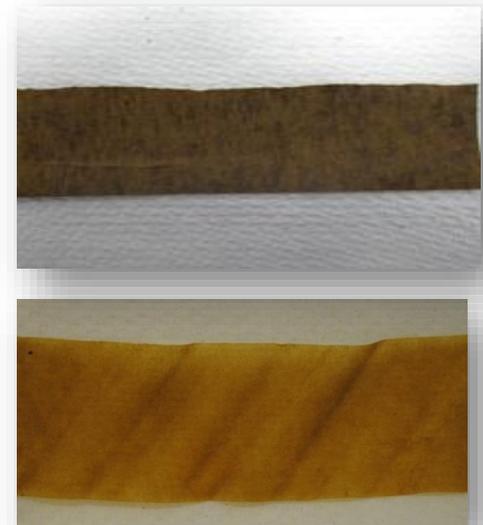
## Oxigénio

- Estável à oxidação
- Sistema de preservação
- Papel termo estabilizado (TU) é mais estável que o papel Kraft convencional

# Envelhecimento dos materiais



- Temperatura ambiente influência temperatura de operação
- Localização do transformador (ventilação)
- Carga, desenho da refrigeração, bombas
- Estabilidade inerente dos materiais
- Posição/localização dentro da unidade
- Presença de condição de falha incipiente
- Fatores não uniformes ao longo do tempo

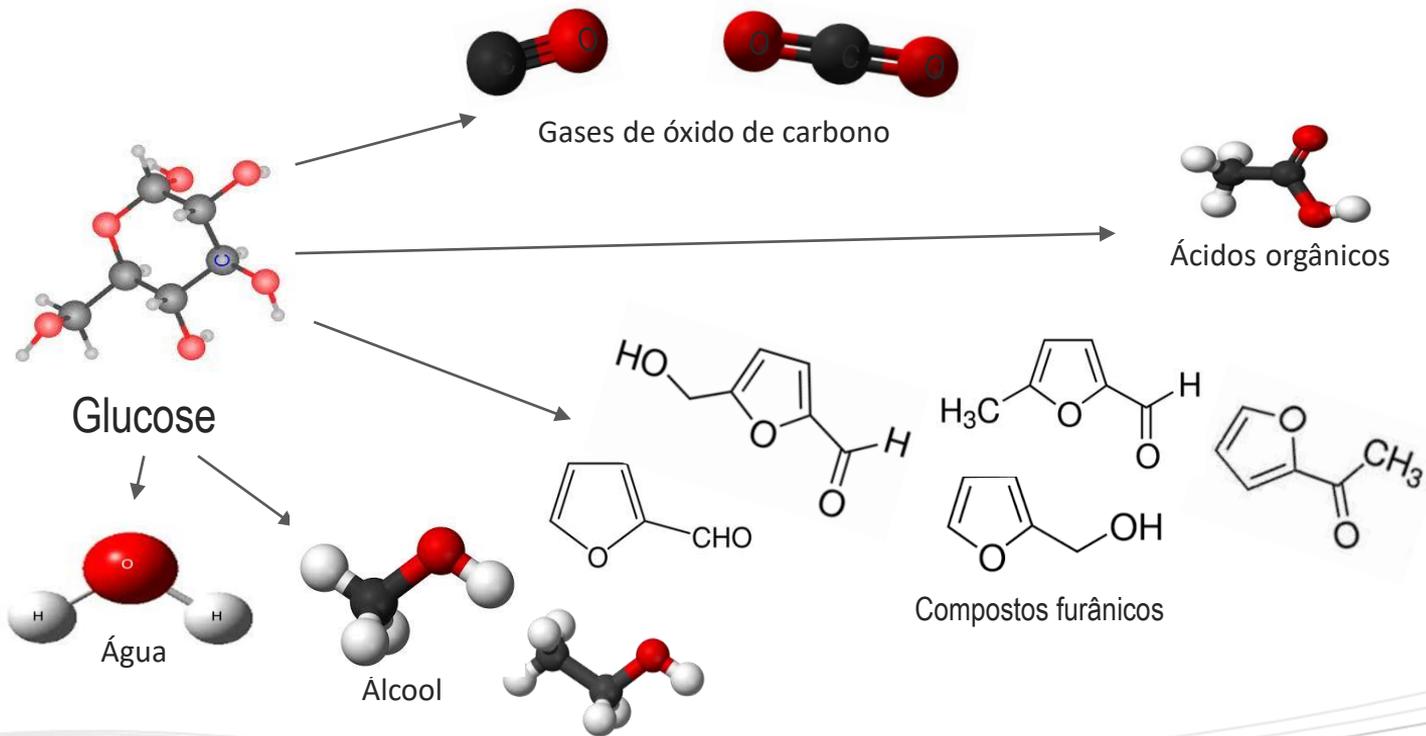




# Testes indiretos de degradação da celulose



Tipicamente realizados através de uma amostra de óleo



# Coeficientes de partição

- Partição entre papel onde se formam componentes furânicos e óleo
- Temperatura
- Papel húmido tende a reduzir a partição para o óleo
- Qualidade do óleo
  - Com a sua degradação, mais compostos polares são formados e aumenta a partição dos componentes furânicos para o óleo
- A taxa de geração pode ser baseada na quantidade de papel no transformador e a melhoria térmica

# Efeitos da descarga elétrica

- Compostos furânicos não se detetam em grandes quantidades quando materiais celulósicos são sujeitos a descargas elétricas.
  - Isolamento celulósico é danificado localmente
  - Monóxido de Carbono é produzido em proporção à quantidade de papel envolvido
- Teoria: as descargas elétricas produzem temperaturas elevadas (>1200°C)
  - Geram-se compostos furânicos
  - Mas degradam-se rapidamente por causa da temperatura

# Precauções

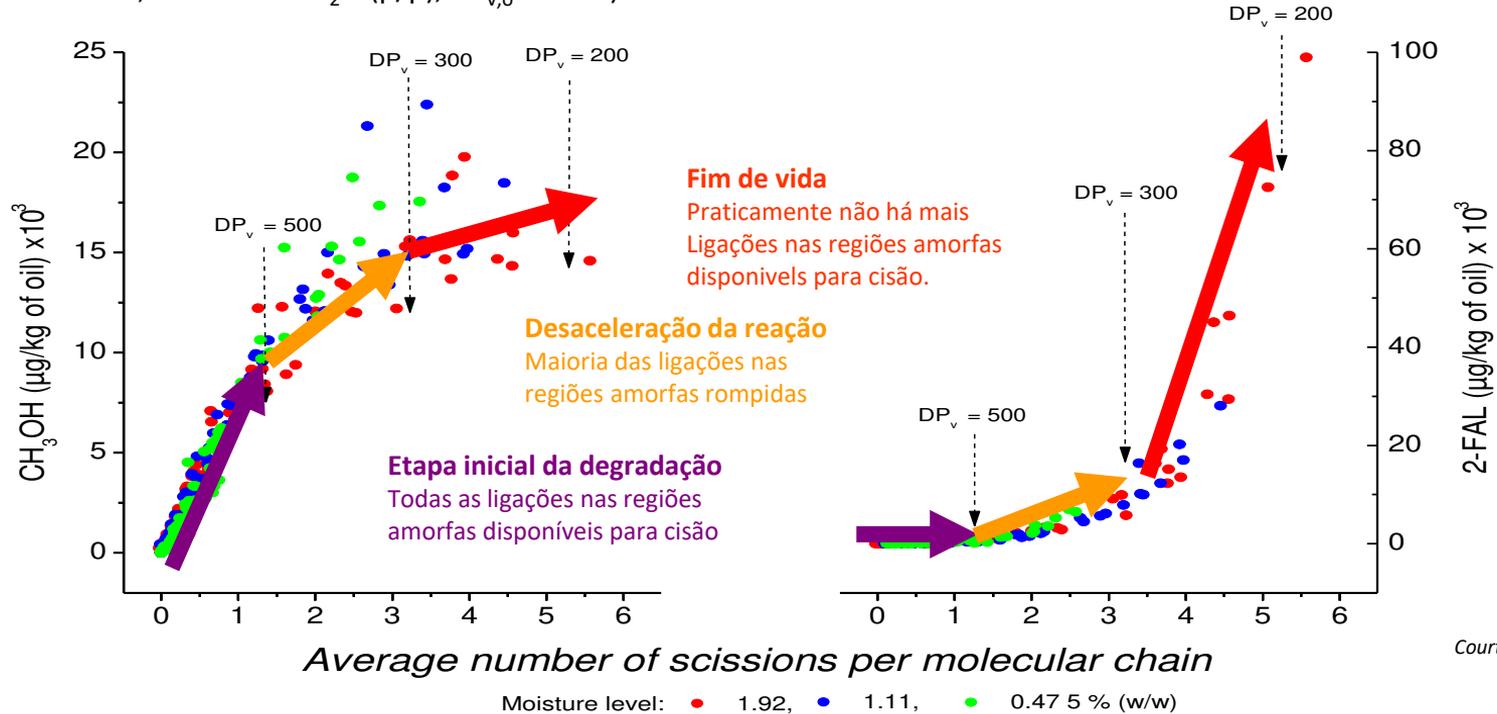
- O papel kraft em conservador aberto geralmente proporciona a melhor tendência
  - Maiores quantidades de compostos furânicos
- Difícil aferir se altas concentrações derivam de pequenas quantidades de isolamento sujeito a altas temperaturas, ou se grandes quantidades a baixas temperaturas.
- O tratamento do óleo alterará as concentrações
  - Necessário monitorizar óleo antes e após tratamento (18 a 24 meses de intervalo) para definição de uma base

# Deteção de álcool

- Metanol e Etanol
- Desvantagem da 2-FAL
  - Papel termo estabilizado (TU)...
    - Detetadas concentrações muito baixas
  - Papel Kraft convencional:
    - Quantidade de 2-FAL influenciado pela humidade no papel

# Envelhecimento em Laboratório

Indicador mais realista - Amostras de papel kraft convencional envelhecido a diferentes condições de humidade e temperatura (60 to 120°C – 0,47 to 1.92% H<sub>2</sub>O (p/p), DP<sub>v,o</sub> = 1168)



Courtesy of IREQ, Varennes, Canada

# Comparação de Metanol e componentes furânicos

- Ao nível de ensaios em laboratório
  - Metanol parece ser mais fiável que o 2-Fal para o óleo mineral
    - Detetados para papel kraft convencional e termo estabilizado (TU)
    - Não influenciado pela quantidade de humidade
    - Sensível à etapa inicial da degradação da celulose
    - É necessário corrigir para 20°C
- Ao nível de ensaios em campo
  - Mais informação para comparar equipamentos e localizar problemas (gestão de ativos)
  - Mais informação para a decisão de remodelação
  - Tratamento do óleo condiciona os dados da mesma forma que os componentes furânicos
  - Amostras devem ser recolhidas com seringa para que não se perca álcoois voláteis

# Reduzir o envelhecimento

- Manter selado e seco – verificar vedantes e juntas, garrafa e pressão do nitrogénio
- Converter conservadores abertos
- Operar a temperaturas mais baixas
- Verificar posição das válvulas, limpar radiadores, adequar a ventilação
- Localizar radiadores bloqueados com câmara de infravermelhos

# Casos de Estudo – Avaliação do Papel

# Compostos Furânicos e Óxidos de Carbono muito elevados

Chapa de características do transformador	Detalhes
Fabricante	Desconhecido
Tipo de equipamento	Transformador de terra, tipo CORE
Capacidade - MVA	11.5
Tensão nominal - kV	33
Sistema de preservação	Almofada de Azoto (inerte, nitrogénio)
Volume de óleo	Desconhecido
Tipo de papel	Kraft
Carga	Alta me períodos cíclicos
Ano de fabrico	Cerca de 1944, com 50 anos de serviço
Condição	Retirado de serviço antes de falha. Foi detetado vapor durante uma tempestade com a temperatura registada perto dos 200°C

# Compostos Furânicos e Óxidos de Carbono muito elevados

Gases dissolvidos no óleo	ppm
Hidrogénio	1,980
Oxigénio	desconhecido
Nitrogénio	desconhecido
Metano	318
<b>Monóxido de Carbono</b>	<b>2,990</b>
Etano	98
<b>Dióxido de Carbono</b>	<b>58,300</b>
Etileno	42
Acetileno	0

Compostos Furânicos	ug/L
<b>2-furfural</b>	<b>35,124 (39.69mg/kg)</b>

- Transformador de terra
- Ligado a alimentador de subtransmissão com condensadores de linha
- Fusíveis de alta tensão queimados, causando sobrecarga durante certas operações, devidas a correntes desequilibradas entre fases
- Provavelmente ocorrendo vários dias por semana, durante dois anos

# Etanol elevado

Chapa de características do transformador	Detalhes
Fabricante	Magnetek
Tipo de equipamento	Transformador, tipo CORE
Capacidade - MVA	22.4
Tensão nominal - kV	138
Sistema de preservação	Almofada de Azoto (inerte, nitrogénio)
Volume de óleo	4050 gallons
Tipo de papel	Termo estabilizado (TU)
Carga	Desconhecida
Ano de fabrico	1986
Condição	Sem falha. Testado porque a qualidade do óleo se degradou rapidamente em dois anos.

# Etanol elevado

Dissolved gases-in-oil	ppm
Hidrogénio	139
Oxigénio	3,270
Nitrogénio	36,800
Metano	123
Monóxido de Carbono	825
Etano	104
Dióxido de Carbono	8,060
Etileno	30
Acetileno	0

Compostos Furânicos	ug/L
5-HMF	< LD
FOL	< LD
2-FAL	255
AF	29
MF	< LD

Alcoois	ppb
Metanol	200
<b>Etanol</b>	<b>1,313</b>

- O Etanol sugere um sobreaquecimento da celulose, que outros ensaios não detetaram



# Obrigado



©2024 Doble Engineering. All Rights Reserved.